після регуляторів насосної станції до такої мінімальної величини

$$P_{рег} = P_{заг} - P_{пер} + 1 \cdot 10^5 . \qquad (34)$$

На цьому теплогідравлічний розрахунок нафтопроводу при перекачуванні заданої кількості долинської нафти з додаванням певної концентрації депресатора закінчений. Визначені загальні втрати напору і відповідно необхідний тиск на виході регуляторів тиску насосної станції. Якщо цей тиск перевищує максимально допустимий тиск із умов міцності трубопроводу, то даний режим перекачування нафти з конкретним вмістом депресатора за певних температурних умовах не може бути реалізований.

Описана вище методика реалізована у програмі DANA. Основний розрахунковий алгоритм написаний на мові програмування Visual Basic і реалізований макросом у середовищі Microsoft Excel. За програмою DANA виконані багатоваріантні теплогідравлічні розрахунки нафтопроводу при перекачуванні долинської нафти з додаванням депресатора.

***Література***


1. Середюк М.Д., Якимів Й.В., Лісафін В.П. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів. – Кременчук, 2001. – 517 с.
2. Болонний В.Т., Середюк М.Д. Дослідження реологічних властивостей нафти Долинського родовища // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. – № 4(13). – С. 34-40.


УДК 622.692.4

# СТІЙКІСТЬ ТРУБОПРОВОДУ НА РЕМОНТНІЙ ДІЛЯНЦІ

***М.М.Семеген***

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46077;*
*e-mail: public@nung.edu.ua*

*На основании интегральных преобразований Фурье определено критическое значение перепада температур металла трубы по длине трубопровода, по которому можно судито о степени возможного продольно-поперечного изгиба трубопровода с учетом температуры окружающей среды. Это позволяет в разных температурных режимах проводить ремонтные работы подземных трубопроводов*

*In the article based on the integral transformations of Furje there is determined critical meaning of temperature changes of pipes metal lengthwise of pipeline in repairing area and owing to this it is possible to judge about scale of possible lengthwise-cross bending of pipeline taking into consideration the environmental temperature. It enables to do repairing works of underground pipelines at different temperature regimes.*

Трубопроводи перебувають у складному напруженому стані, піддаючись дії внутрішнього тиску продукту, а також інших багаточисельних навантажень, які по-різному проявляються в особливих ситуаціях. При цьому міцнісні показники трубопроводу повинні забезпечувати його роботоздатність в будь-яких умовах і при будь-яких ситуаціях. Під час експлуатації трубопроводів внаслідок різних причин виникають ситуації, коли необхідно проводити ремонтні роботи. Наприклад, внаслідок розмиву ділянки трубопроводу частина його знаходиться в ґрунті, а частина на повітрі чи у воді, тому трубопровід знаходиться в різних температурних режимах. Нормативних даних для визначення напруженого стану трубопроводів на ремонтних ділянках немає, оскільки на нього в експлуатаційних умовах впливати можуть, окрім внутрішнього тиску, ще:

– просадки ґрунту;
– тиск сповзаючих ґрунтів;
– рельєф місцевості і інше.

Як бачимо, в такій ситуації положення трубопроводу і відповідно напружений стан відрізняється від проектного. В таких умовах наявність в тілі трубопроводу різних температурних градієнтів призводить до утворення нерівномірних деформацій його елементів. Оскільки суцільність тіла трубопроводу не повинна порушуватись, в ньому виникає система температурних деформацій і відповідних їм температурних напружень, які залежать від розподілу температури по тілу труби.

Тому одним із найбільш раціональних способів при ремонтних роботах є контроль напружено-деформованого стану металу труби трубопроводу в критичних перерізах. В кожному випадку треба розглядати розрахункову модель, наближену до реальної.

Відомі розв’язки задач такого типу, що належать В.І.Смирнову, В.В.Кабанову [4], К.Е.Бирсану, де прогин $w$ при втраті стійкості задавався у вигляді тригонометричного ряду. Для такого характеру зусиль розв’язання задачі в тригонометричних рядах досить трудомістке, оскільки доводиться проводити математичні операції з великим числом членів цього ряду.

Розглянемо ділянку трубопроводу з різним градієнтом температури на рисунку 1. На даному рисунку показано частину заглибленого в ґрунт трубопроводу, який перебуває при температурі $T_1$, а частина звільнена від ґрунту під час ремонтних робіт, – при температурі $T_2$, яка

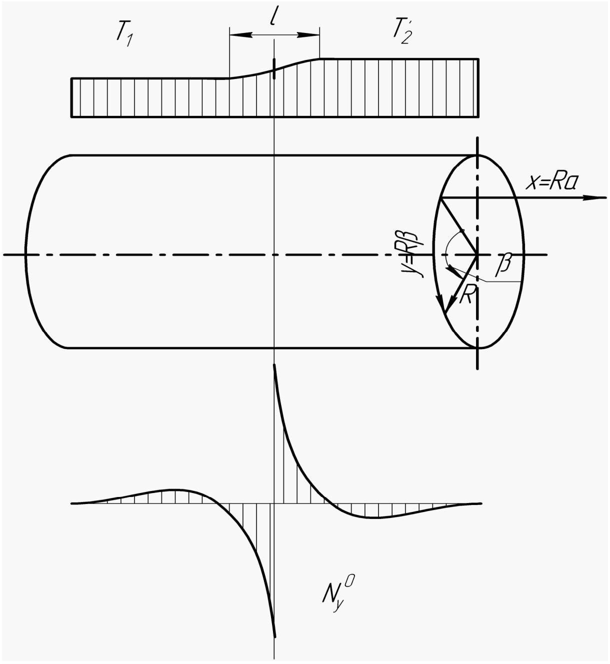


**Рисунок 1 – Ділянка трубопроводу з різним температурним градієнтом**

внаслідок зміни температури навколишнього середовища може змінитися до $T_2'$. Вважаємо, що на певній ділянці трубопроводу довжиною $l$ існує різниця температур $\Delta T = T_2' - T_1$. Для спрощення моделі вважаємо, що $l$ порівняно з довжиною розглядуваної ділянки трубопроводу досить незначна величина, тому нелінійність зміни температури на цій ділянці не враховуємо, вважаємо, що температура на ній змінюється стрибком по границі розрізу.

Будемо враховувати, що температура по товщині стінки трубопроводу постійна, а по довжині спостерігається перепад температур, вплив якого призводить до появи нормальних кільцевих зусиль $N_y^0$, які зумовлюють поздовжньо-поперечний згин трубопроводу. При певному перепаді температур $T_{кр} = \Delta T = T_2' - T_1$ вони можуть призвести до випучування трубопроводу, тому постає необхідність врахування впливу даної температури при проведенні ремонтних робіт. Фізичні константи металу труби приймаємо такими, що не залежать від температури. Більш простим та інформативним методом розв'язання цієї задачі є метод на основі інтегральних перетворень Фур'є. В такому випадку напружений стан, який передує критичному, буде [1]

$$N_y^0 = \frac{1}{2} Eh\alpha_t T_{кр} g(a), \qquad (1)$$

де:

$$g(a) = e^{-\lambda a}\cos\lambda a \quad \text{при} \quad a \ge 0;$$

$$g(a) = e^{+\lambda a}\cos\lambda a \quad \text{при} \quad a \le 0;$$

$R$ – зовнішній радіус трубопроводу;
$\nu$ – коефіцієнт Пуассона;
$h$ – товщина трубопроводу;

$\lambda^4 = 3(1-\nu^2)\dfrac{R^2}{h^2}$ – безрозмірний коефіцієнт, який залежить від відношення зовнішнього радіуса до товщини трубопроводу;
$E$ – модуль пружності матеріалу;
$\alpha_t$ – коефіцієнт лінійного розширення;

$a = \dfrac{x}{R}$ – безрозмірна координата вздовж твірних трубопроводу.

Поздовжньо-поперечний згин трубопроводу слід очікувати в області дії стискаючих зусиль $N_y^0$. Якщо нехтувати викривленням твірних трубопроводу до випучування, то рівняння стійкості матиме вигляд

$$\frac{1}{Eh}\nabla^2\nabla^2\varphi + \frac{1}{R}\cdot\frac{\partial^2 w}{\partial^2 x} = 0; \qquad (2)$$

$$\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}\nabla^2\nabla^2 w - \frac{1}{R}\cdot\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + N_y^0\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0,$$

де: $\varphi$ – функція напружень;
$\nabla$ – диференціальні оператори.

$$N_x = \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2};\; N_y = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2};\; S = -\frac{\partial^2\varphi}{\partial x\partial y}.$$

Припустимо

$$w = \sum_{n=2}^{\infty} w_n \cos n\beta \;;\; \varphi = \sum_{n=2}^{\infty}\varphi_n \cos n\beta\;, \qquad (3)$$

де $w_n$ та $\varphi_n$ – невідомі функції координати x. Враховуючи безрозмірну координату $a$, з (2) отримаємо

$$\left(\frac{d^2}{da^2} - n^2\right)^2\varphi_n + ERh\frac{d^2 w_n}{da^2} = 0\;;$$

$$\left(\frac{d^2}{da^2} - n^2\right)^2 w_n - \frac{4\lambda^4}{EBh}\cdot\frac{d^2\varphi_n}{da^2} - \qquad (4)$$

$$-2\lambda^4 n^2\alpha_t T_{кр} g(a) w_n = 0\,.$$

Застосовуємо перетворення Фур'є для визначення критичного перепаду температур

$$F(s) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} f(a)e^{isa}da\,. \qquad (5)$$

Враховуючи граничні умови задачі

$$w_n, \frac{dw_n}{da}, \ldots, \varphi_n, \frac{d\varphi_n}{da}, \ldots \to 0$$

при $a \to \pm\infty$,

з (4) отримаємо

$$\left(s^2 + n^2\right)^2\Phi(s) - ERhs^2 W(s) = 0\;,$$

$$\left(s^2+n^2\right)^2 W(s)+\frac{4\lambda^4 s^2}{ERh}\Phi(s)- \\ -\sqrt{\frac{2}{\pi}\lambda^4 n^2 \alpha_t T_{kp}}\int_{-\infty}^{\infty} g(a) w_n e^{isa} da = 0 , \quad (6)$$

де $W(s)$, $\Phi(s)$ – трансформанти Фур'є невідомих функцій $w_n$ та $\varphi_n$.

Виключаючи $\Phi(s)$, отримаємо

$$\left[\left(s^2+n^2\right)^4+4\lambda^4 s^4\right] W(s)= \\ =\sqrt{\frac{2}{\pi}}\lambda^4 n^2\left(s^2+n^2\right)^2 \alpha_t T_{kp}\int_{-\infty}^{\infty} g(a) w_n e^{isa} da . \quad (7)$$

Згідно з теоремою про згортання трансформант і формули Ейлера для комплексних чисел

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(a) w_n e^{isa} da = \\ =\sqrt{\frac{2}{\pi}} i\int_{-\infty}^{\infty}\frac{(s-\xi)^3}{4\lambda^4+(s-\xi)^4} W(\xi) d\xi . \quad (8)$$

Підставляючи (8) в (7) та вводячи позначення

$$\frac{\sqrt{\left(s^2+n^2\right)+4\lambda^4 s^4}}{s^2+n^2} W(s)=V(s) ,$$

отримаємо

$$V(s)=T_{kp}\int_{-\infty}^{\infty} K(s,\xi) V(\xi) d\xi , \quad (9)$$

де

$$K(s,\xi)=\frac{2}{\pi} i\lambda^4 n^2 \alpha_t \frac{s^2+n^2}{\sqrt{\left(s^2+n^2\right)^4+4\lambda^4 s^4}}\times \\ \times\frac{\xi^2+n^2}{\sqrt{\left(\xi^2+n^2\right)^4+4\lambda^4 \xi^4}}\cdot\frac{(s-\xi)^3}{4\lambda^4+(s-\xi)^4} . \quad (10)$$

Таким чином, система диференціальних рівнянь (2) звелась до інтегрального рівняння Фредгольма (9) другого роду з симетричним ядром, де як шуканий параметр фігурує критичний перепад температур $T_{кр}$.

Згідно з теорією симетричних інтегральних рівнянь найменше значення $T_{кр}$ можна визначити за формулою

$$T_{кр}=\frac{1}{\sqrt{A_2}} , \quad (11)$$

де другий слід ядра

$$A_2=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left|K(s,\xi)\right|^2 ds d\xi . \quad (12)$$

Підставляємо значення $K(s,\xi)$ з (10) в (12), отримаємо

$$T_{кр}=\frac{K_t}{\sqrt{3\left(1-\nu^2\right)}}\cdot\frac{h}{\alpha_t R} , \quad (13)$$

де

$$K_t=\pi\cdot\left\{2\mu^2\cdot\left[\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left(\frac{\left(z^2+1\right)^2}{\left(z^2+1\right)^4+4\mu^4 z^4}\times\right.\right.\right. \quad (14) \\ \left.\left.\left.\times\frac{\left(\eta^2+1\right)^2}{\left(\eta^2+1\right)^4+4\mu^4\eta^4}\cdot\frac{(z-\eta)^6}{\left[4\mu^4+(z-\eta)^4\right]^2} dz d\eta\right)\right]^{1/2}\right\}^{-1} ;$$

$$\mu=\frac{\lambda}{n} ,\ z=\frac{s}{n} ,\ \eta=\frac{\xi}{n} .$$

Визначивши критичне значення перепаду температур металу труби, можна судити про ступінь можливого випучування трубопроводу з врахуванням температури $T_2'$. Це дає можливість в різних температурних режимах проводити ремонтні роботи підземних трубопроводів з визначенням їх довжини розкриття від ґрунту.

### *Література*


1. Огибалов П.М., Грибанов В.Ф. Термоустойчивость пластин и оболочек. – М.: Московский университет, 1968.
2. Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. – К.: ИНДПРОМ, 1998.
3. Кривошеин Б.Л. Теплофизические расчеты газопроводов. – М.: Недра, 1982.
4. Кабанов В.В. Устойчивость анизотропной круговой цилиндрической оболочки при продольном сжатии, внутреннем давлении и неравномерном нагреве по длине. – К.: Наукова думка, 1964.
5. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. – М.: Машиностроение, 1974.
6. Бородавки П.П. Прочность магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1984.
7. Вигак В.М. Управление температурными напряжениями и перемещениями. – К.: Наукова думка, 1988.