

УДК 624.138.22

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.155.2015.92009>

ОЦІНКА БЕЗВІДМОВНОСТІ ЛІНІЙНОЇ ЧАСТИНИ МАГІСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ

Д-р техн. наук С.Ф. Пічугін, канд. техн. наук О.Є. Зима, асп. П.Ю. Винников

ОЦЕНКА БЕЗОТКАЗНОСТИ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

Д-р техн. наук С.Ф. Пичугин, канд. техн. наук Зима А.Е., асп. Ф.Ю. Винников

THE MAIN PIPELINES LINEAR PART RELIABILITY ESTIMATION

Doct. of techn. sciences S. Pichugin, Ph. D. O. Zyma, Postgraduate P. Vynnykov

Проведено порівняння розрахунку товщини стінки ділянки лінійної частини магістрального трубопроводу за нормами різних країн. Приведено особливості розрахунку за методом граничних станів. Отримано статистичні характеристики внутрішнього робочого тиску у трубопроводі. Виведено функцію надійності лінійної частини підземного магістрального трубопроводу у техніці випадкових величин. Визначено оцінки надійності лінійної частини підземного магістрального трубопроводу за параметром кільцевих напружень.

Ключові слова: випадкова величина, робочий тиск, кільцеві та поздовжні напруження, безвідмовність, лінійна частина трубопроводу.

Проведено сравнение расчета толщины стенки участка линейной части магистрального трубопровода по нормам разных стран. Приведены особенности расчета согласно методике предельных состояний. Определены статистические характеристики внутреннего рабочего давления в трубопроводе. Получена функция надежности линейной части подземного магистрального трубопровода в технике случайных величин. Определены оценки надежности линейной части подземного магистрального трубопровода по параметру кольцевых напряжений.

Ключевые слова: случайная величина, рабочее давление, кольцевые и продольные напряжения, безотказность, линейная часть трубопровода.

Comparison of the pipeline linear part wall thickness calculation by the requirements of the different countries is conducted. Calculation features by the ultimate states and allowable stresses method are shown. Distribution law and statistical characteristics of the external pressure is obtained. Reliability methodic of the buried main pipelines linear part is developed. For the first time main pipelines linear part reliability values are calculated by the parameter of the circular stresses.

Keywords: keywords: random variables, operating pressure, radial and longitudinal stresses, reliability, pipelines linear part.

Вступ.

Лінійна частина є найбільш металоємною, а отже найдорожчою ланкою будівництва системи магістральних трубопроводів. Оскільки діаметр

трубопроводу та внутрішній тиск пов'язані між собою технологічними параметрами [1 – 3], отже, найбільш суттєвим важелем регулювання міцності, стійкості, надійності і економічності зведення трубопроводу є

Обрані праці 5-ї міжнародної науково-технічної конференції з будівельних матеріалів, конструкцій та споруд «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 23–24 квітня 2015 року

товщина стінки лінійної частини магістрального трубопроводу (ЛЧМТ). В Україні показники надійності будівельних конструкцій, у тому числі трубопроводів, встановлюються у ДБН [4]. Згідно з ним ЛЧМТ відноситься до найвищого класу наслідків (відповідальності) – СС3 (припинення функціонування об'єктів транспорту загальнодержавного рівня). При цьому гранично допустима імовірність відмови має складати $1 \cdot 10^{-6}$ [4].

З позицій надійності окремої уваги заслуговують внутрішні норми ОАО «Газпром» [5]. Найбільший здобуток даного документу чітка диференціація системи магістральних трубопроводів на структурні частини та елементи, формування простору граничних станів ЛЧМТ, а також формування загальних моделей, придатних для оцінки надійності ЛЧМТ, хоча конкретних методик визначення рівня надійності у вказаних нормах не наведено.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з практичними задачами.

На даний момент існує два методи визначення геометричних характеристик несучих конструкцій: допустимих напружень та граничних станів. Перший широко використовується у закордонних нормах проектування, зокрема ASME, DIN, British standards та ін. [2, 6 – 8], він базується на понятті допустимого напруження (σ) як максимально безпечного для даного елемента. Критерієм відношення допустимого напруження до небезпечного (критичного) є коефіцієнт запасу міцності (КЗМ), який представляє собою відношення цих напружень. Значення КЗМ залежить від стану матеріалу, характеру діючого навантаження, характеру небезпечного напруження, межі текучості σ_y , межі міцності σ_u , його значення може коливатися у межах $K [1,4 - 1,6 \dots 2,4 - 2,6]$ [2, 8].

Вітчизняні норми проектування магістральних трубопроводів базуються на прогресивному методі граничних станів [2, 9], в основі якого лежить імовірнісний підхід до описання навантажень та впливів, а також характеристик міцності матеріалів конструкцій. Метод передбачає оцінку декількох граничних станів (міцність, стійкість, деформативність), які регламентують роботу конструкції. Тут використовується замість одного коефіцієнта запасу міцності диференційована система коефіцієнтів, кожний з яких відповідає за стохастичність окремої групи факторів [2, 9].

Узагальнене порівняння норм різних країн є достатньо важкою задачею, враховуючи, фундаментальну відмінність підходів до розрахунку, різні критерії

міцності (межа текучості σ_y , межа міцності σ_u), характеристики матеріалів конструкцій різних країн [2, 6 – 8].

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Визначення товщини стінки трубопроводу, перевірка за критеріями кільцевих $\sigma_{\kappa\kappa}$ та поздовжніх осьових $\sigma_{\text{позд}N}$ та фібрових $\sigma_{\text{позд.фібр.}}$ напружень проводиться з умови не перевищення останніх тимчасового опору розтягу матеріалу труб R_1 . Між тим коефіцієнти надійності фактично забезпечують рівень напружень, що не перевищує межу текучості матеріалу R_2 [2, 10].

$$R_1 = \frac{R_1^H m}{k_1 k_H}; \quad R_2 = \frac{R_2^H m}{k_2 k_H}, \quad (1)$$

де R_1^H та R_2^H – нормативні значення опорів розтягу приймаються рівними мінімальним значенням тимчасового опору та межі текучості відповідно;

Обрані праці 5-ї міжнародної науково-технічної конференції з будівельних матеріалів, конструкцій та споруд «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 23–24 квітня 2015 року

m – коефіцієнт умов роботи трубопроводу;

k_1, k_2 – коефіцієнт надійності за матеріалом;

k_n – коефіцієнт надійності за призначенням трубопроводу.

Крім того, визначення розрахункових опорів на розтяг металу труб R_1 та R_2 у чинних нормах є недостатньо обґрунтованим з точки зору підходу теорії надійності, оскільки коефіцієнти у формулах (1) варіюють розрахунковий опір металу труб у межах від 70% до 35% від нормативного [11 – 15]. Таке значне зниження розрахункового опору має бути статистично обґрунтованим і потребує перегляду відповідно до сучасних технологій та існуючих методик розрахунку [9, 14].

Через відсутність диференціації коефіцієнту запасу міцності у закордонних стандартах, його значення мають ще більш необґрунтований характер, таким чином він більше схожий на «коефіцієнт незнання» [2, 9].

Визначення мети та задач дослідження.

Тому, за мету роботи прийнято оцінити безвідмовність ділянки лінійної частини підземного магістрального нафтопроводу за критерієм кільцевих напружень. Для цього ставляться задачі: розрахунку товщини стінки ділянки трубопроводу за методами допустимих напружень (за міжнародними нормами) та граничних станів згідно методики СНіП, та обґрунтування імовірнісної моделі внутрішнього робочого тиску у трубопроводі.

Основний матеріал дослідження.

Товщина стінки згідно СНіП 2.05.06-85 визначається на основі методу граничних станів [10]:

$$t_n = \frac{npD}{2(R_1 + np)}, \quad (2)$$

де n – коефіцієнт надійності за навантаженням – внутрішньому робочому тиску у трубі [10];

P – робочий (нормативний) тиск у трубі.

Отримана товщина стінки заокруглюється у більшу сторону з точністю 0,1 мм. Оскільки вона вже враховує мінусовий допуск, то може використовуватися як номінальна при замовленні великої партії труб. Якщо використовують труби з сортаменту, товщина стінки заокруглюється до ближчого більшого значення.

ASME B31.4; CSA-Z183 (нафтопроводи) [6, 8].

$$t_n = \frac{P_d D}{2S}; \quad (3)$$

$$S = FE_{зв.шва} \sigma_y, \quad (4)$$

де P_d – максимально допустимий робочий тиск (МДРТ). Вітчизняним аналогом МДРТ є добуток нормативного тиску на коефіцієнт надійності за навантаженням $P_d = np \cdot t_n$ – номінальна товщина стінки;

D – зовнішній діаметр труби;

S – допустиме напруження;

σ_y – нормативна межа текучості;

$E_{зв.шва}$ – коефіцієнт міцності зварного шва, зазвичай рівний 1,00;

F – розрахунковий коефіцієнт, який залежить від класу розташування ділянки.

ISO 13623 [7].

$$t_n = \left(1 - \frac{\Delta^*}{100} \right)^{-1} \frac{P_d D}{2F\sigma_y + P_d}, \quad (5)$$

де Δ^* – відносний заводський допуск на товщину стінки (%);

F – розрахунковий коефіцієнт для кільцевих напружень. Він може приймати значення 0,77 та 0,67, крім того, можливе

Обрані праці 5-ї міжнародної науково-технічної конференції з будівельних матеріалів, конструкцій та споруд «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 23–24 квітня 2015 року

зменшення значень коефіцієнта (0,55 та 0,45) залежно від класу розташування.

British Standard BS 8010: Part 2 [2]. За нормами Великобританії [2, 8] товщина стінки визначається аналогічно методиці ASME, однак не враховує температурний коефіцієнт. Крім того, безпосередньо у розрахунку необхідно враховувати заводський допуск на товщину стінки.

$$t_n = \left(1 - \frac{\Delta^*}{100}\right)^{-1} \frac{P_d D}{2FE\sigma_y} \quad (6)$$

Розрахунковий коефіцієнт F може приймати значення 0,72 та 0,6.

- **Норми Німеччини DIN 2470, Teil 2; DIN 2413** [2]. Формально номінальна товщина стінки має враховувати допуски на корозію та знос, але для ЛЧМТ цей допуск приймається рівним нулю.

$$t_n = \left(1 - \frac{\Delta^*}{100}\right)^{-1} \frac{P_d D}{2E[\sigma]} \quad (7)$$

де E – коефіцієнт міцності поздовжнього зварного шва, зазвичай рівний 1,00;

$[\sigma]$ – допустиме напруження, яке згідно [2, 8] визначається діленням нормативної межі текучості σ_y на коефіцієнт запасу K_y .

Значення коефіцієнта запасу K_y залежить від видовження зразка при розриві δ_5 та призначення трубопроводу, та коливається у межах 1,4 – 1,7 [2].

Пряме порівняння розрахунку ділянки ЛЧМТ за різними нормами неможливе, у даному порівнянні приймемо умовну відповідність для різних норм проектування (табл. 1) [2]. Усі розрахунки та порівняння товщин стінок виконані для ділянки магістрального нафтопроводу розташованого на території України [11, 12] МДРТ $P_d = 5,5 \text{ МПа}$, що відповідає робочому тиску за вітчизняними нормами $p = 5 \text{ МПа}$. Трубопровід діаметром 1020 мм (І

категорія), зовнішні впливи, пов'язані з вагою ґрунту засипки та нерівномірним осіданням основи – відсутні [14, 15].

Коефіцієнти надійності за СНіП $k_1 = 1,4$, $k_n = 1,00$ [10].

Матеріал трубопроводу сталь марки 17Г1С-Т, що аналогічно сталі класу X70 за API 5L. Нормативна межа міцності $\sigma_u = 589 \text{ МПа}$, нормативна межа текучості $\sigma_y = 482 \text{ МПа}$. Для отримання фактичних товщин стінок за іноземними нормами до розрахованих мінімальних товщин додається заводський допуск, який за стандартом API 5L складає 10% [2].

З аналізу табл. 2 видно, що найтонша, а отже найбільш економічна товщина стінки, для усіх класів безпеки, отримана саме за методикою СНіП 2.05.06-85 [10], крім того, спостерігається найбільша мінливість товщини стінки. Товщини стінки, розраховані за іноземними нормами мають достатньо близькі між собою значення, але найбільший запас міцності магістрального трубопроводу забезпечується його розрахунком за Британськими нормами BS 8010.

Під час капітального ремонту ділянки трубопроводу було використано труби з товщиною стінки $t_n = 9 \text{ мм}$, що відповідає «середньому класу» безпеки та відповідає І – ІІ класу відповідальності згідно класифікації СНіП [10].

Зважаючи на відносно маленьку товщину стінки трубопроводу, розраховану за вітчизняними нормами та прийняту у проекті, на відміну від аналогічних розрахунків за іноземними документами, на перший погляд здається, що надійність трубопроводу недостатня. Тому, доцільно оцінити надійність ЛЧМТ за параметром не перевищення кільцевими напруженнями межі міцності матеріалу труб. Однією з переваг розрахунку будівельних конструкцій за методом граничних станів є прямий перехід до методів теорії надійності,

Обрані праці 5-ї міжнародної науково-технічної конференції з будівельних матеріалів, конструкцій та споруд «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 23–24 квітня 2015 року

оскільки навантаження та характеристики використанням теорії імовірності. міцності матеріалів визначаються з

Таблиця 1

Порівняння значень розрахункових коефіцієнтів для ділянок трубопроводів за різними нормами

Умовний клас безпеки	СНІП 2.05.06-85: коефіцієнт умов роботи: m	ASME B31.8: розрахунковий коефіцієнт F	ISO 13623: розрахунковий коефіцієнт F	BS 8010: Part 2. розрахунковий коефіцієнт F	DIN 2470, Teil 2; DIN 2413: коеф. запасу K_y
Нормальний	III-IV $m=0,90$	1 $F=0,72$	Головна траса $F=0,77$	Головна траса $F=0,72$	$K_y=1,5$
Середній	I-II $m=0,75$	2 $F=0,60$	Відповідальні ділянки $F=0,67$	Відповідальні ділянки $F=0,60$	$K_y=1,6$
Високий	V $m=0,60$	3 $F=0,50$	Клас розташування 4 $F=0,55$	-	$K_y=1,7$

Таблиця 2

Розраховані товщини стінок ділянки ЛЧМТ за різними нормами

Зовнішній діаметр	Клас безпеки	Товщина стінки трубопроводу	СНІП 2.05.06-85:	ASME CSA-Z183	ISO 13623	BS 8010 Part 2.	DIN 2470 DIN 2413
$D_n = 1020$ мм	Нормальний	t_n , мм	7,4	8,1	8,4	9,0	9,7
		t_n , %	100	111	114	123	133
	Середній	t_n , мм	8,7	9,7	9,6	10,8	10,4
		t_n , %	120	133	131	148	142
	Високий	t_n , мм	10,8	11,7	11,7	-	11,0
		t_n , %	149	159	159	-	151

Експериментальні дані зміни внутрішнього тиску отримані за результатами спостережень на ділянці магістрального трубопроводу за 3 місяці. Генеральна вибірка становить 3436 значень, знятих протягом трьох місяців [12, 13]. При цьому навіть при стаціонарному режимі роботи трубопроводу спостерігалися істотні коливання тиску як у сторону збільшення,

так і в сторону зменшення номінального значення тиску.

У роботі трубопроводу протягом вказаного періоду було виокремлено 11 проміжків зі стаціонарним режимом роботи. З метою підвищення достовірності отриманих результатів, до одного проміжку потрапляло не менше 20 вимірів тиску, а тривалість періоду становила не менше 12 годин. У результаті аналізу зроблено

Обрані праці 5-ї міжнародної науково-технічної конференції з будівельних матеріалів, конструкцій та споруд «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 23–24 квітня 2015 року

висновок про нормальність розподілу внутрішнього робочого тиску у трубопроводі. Стохастичні показники значень робочого тиску: математичне очікування $\bar{p} = 4,56$ МПа; середньоквадратичне відхилення $\hat{p} = 0,314$ МПа.

Коефіцієнт варіації для трубних сталей приймаємо рівним $V_R = 0,1$, що визначає математичне очікування та стандарт для розглядуваної сталі:

$$\bar{R} = \frac{589}{1 - 1,64 \cdot 0,1} = 704,55 \text{ МПа}; \quad (8)$$

$$\hat{R} = 0,1 \cdot 704,55 = 70,46 \text{ МПа}. \quad (9)$$

Функція надійності трубопроводу.

$$\tilde{Y} = \tilde{R} - \tilde{S} = \tilde{\sigma}_y - \tilde{\sigma}_{\kappa\zeta} \geq 0 \quad (10)$$

Математичне очікування та стандарт відповідно:

$$\bar{Y} = \bar{R} - \bar{S} = \bar{\sigma}_y - \bar{\sigma}_{\kappa\zeta} = \bar{\sigma}_y - \frac{\bar{p}D}{2t_{\text{факт}}}; \quad (11)$$

$$\hat{Y} = \hat{R} - \hat{S} = \hat{\sigma}_y - \hat{\sigma}_{\kappa\zeta} = \sqrt{(\hat{\sigma}_y)^2 - \left(\frac{\hat{p}D}{2t_{\text{факт}}}\right)^2}, \quad (12)$$

де $t_{\text{факт}}$ – товщина стінки розрахована згідно методики СНіП.

Характеристика безпеки

$$\beta = \frac{\bar{Y}}{\hat{Y}} = \frac{\bar{\sigma}_y - \bar{\sigma}_{\kappa\zeta}}{\sqrt{(\hat{\sigma}_y)^2 - \left(\frac{\hat{p}D}{2t_{\text{факт}}}\right)^2}} = \frac{\hat{\sigma}_y - \frac{\hat{p}D}{2t_{\text{факт}}}}{\sqrt{(\hat{\sigma}_y)^2 - \left(\frac{\hat{p}D}{2t_{\text{факт}}}\right)^2}}. \quad (13)$$

Імовірність безвідмовної роботи:

$$P(\beta) = 0,5 + \Phi(\beta). \quad (14)$$

де $\Phi(\beta)$ – значень функції Лапласа для відповідного значення характеристики безпеки β .

Таблиця 3

Імовірність безвідмовної роботи ділянки нафтопроводу за параметром кільцевих напружень для товщини стінки розрахованої згідно методики СНіП

Зовнішній діаметр	Умовний клас безпеки	Товщина стінки трубопроводу	СНіП 2.05.06-85:	$\bar{\sigma}_{\kappa\zeta}$, МПа	$\hat{\sigma}_{\kappa\zeta}$, МПа	\bar{Y} , МПа	\hat{Y} , МПа	β	$P(\beta)$
$D_n = 1020$ мм	Нормальний	t_n , мм	7,4	312,20	21,64	392,40	73,71	5,32	$5,79 \cdot 10^{-8}$
	Середній	t_n , мм	8,7	265,55	18,41	439,05	72,82	6,03	$9,8 \cdot 10^{-10}$
	Проектна	t_n , мм	9	256,70	17,79	447,90	72,67	6,16	$2,85 \cdot 10^{-10}$
	Високий	t_n , мм	10,8	213,92	14,83	490,68	72,00	6,81	$5,23 \cdot 10^{-12}$

Обрані праці 5-ї міжнародної науково-технічної конференції з будівельних матеріалів, конструкцій та споруд «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 23–24 квітня 2015 року

Для порівняння, гранично допустима імовірність відмови для класу наслідків (відповідальності) – ССЗ має складати $1 \cdot 10^{-6}$, таким чином конструкція має значний запас міцності за параметром кільцевих напружень [4].

Висновки з дослідження та перспективи, подальшого розвитку в даному напрямку.

Товщини стінки, розраховані за іноземними нормами мають достатньо близькі між собою значення, але найбільший запас міцності [123 – 159%] магістрального трубопроводу забезпечується його розрахунком за Британськими нормами BS 8010, що є необґрунтованим з позицій надійності.

Найтонша, а отже найбільш економічна товщина стінки, для усіх класів безпеки, отримана саме за методикою СНіП 2.05.06-85 $t_n \in [7,4...10,8 \text{ мм}]$, загалом економія витрат сталі в середньому складає 10%.

Найбільша мінливість товщини стінки трубопроводу спостерігається у розрахунках за методикою СНіП 2.05.06-85, що пояснюється диференціацією коефіцієнту запасу на декілька коефіцієнтів, кожний з яких відповідає за стохастичну природу окремого параметру.

У результаті оцінки надійності ділянки трубопроводу з товщиною стінки $t_n = 9 \text{ мм}$ (що відповідає «середньому класу» безпеки, та відповідає I – II класу відповідальності згідно класифікації СНіП), імовірність безвідмовної роботи за параметром кільцевих напружень склала $P(\beta) = 2,85 \cdot 10^{-10}$, при цьому гранично допустима імовірність відмови для класу наслідків (відповідальності) – ССЗ має складати $1 \cdot 10^{-6}$. Це свідчить про високий запас міцності та надійності незважаючи на відносну економічність отриманої товщини стінки.

Список використаних джерел

1. Харитонов В.А. Строительство магистральных трубопроводов нефти и газа / В.А. Харитонов. – М.: АСВ, 2008. – 496 с.
2. Иванцов О.М. Безопасность трубопроводных систем / О.М. Иванцов, И.И. Мазур. – М.: Елима, 2004. – 1104с.
3. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость / А.Б. Айнбиндер. – М.: Недра, 1991. – 284с.
4. ДБН В.1.2-14-2009 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – К.: Мінергіонбуд. – 2009. – 29с.
5. РД 51-4.2-003-97 Методические рекомендации по расчетам конструктивной надежности магистральных газопроводов. – М.: ИРЦ Газпром, 1997. – 90 с.
6. ASME B31.3. Process Piping. American Society of Mechanical Engineers. New York, 1999. – 113 p.
7. EN 1993-4-3 (2007) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 4-3: Pipelines [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. – 44 p.
8. Ellenberger J.P. Piping and Pipeline Calculations Manual. Construction, Design Fabrication and Examination / J. Philipp Ellenberger. – USA, Oxford.: Elsevier, 2014. – 398 P.
9. Пичугин С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий: монография / С.Ф. Пичугин. – М.: Издательство АСВ, 2011. – 452 с.
10. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 52 с.

Обрані праці 5-ї міжнародної науково-технічної конференції з будівельних матеріалів, конструкцій та споруд «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 23–24 квітня 2015 року

11. Pichugin S.F. Calculation of the reliability of steel underground pipelines / S.F. Pichugin, A.V. Makhin'ko // Strength of Materials. Vol. 41. – Number 5. – Springer Science, 2009. – P. 541 – 547.
12. Зима О.Є. Надійність сталевих конструкцій магістрального трубопроводу: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. тех. наук: 05.23.01 // О.Є. Зима – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – 22 с.
13. Пічугін С.Ф. Надійність сталевих підземних магістральних трубопроводів під час ремонтних робіт та у стаціонарних умовах / С.Ф. Пічугін, О.Є. Зима // Промислове будівництво та інженерні споруди, №4, 2013. – С.6 – 12.
14. Pichugin S.F Probabilistic calculation of the buried petroleum and gas pipelines / S.F. Pichugin, P.Y. Vynnykov // Conference reports materials. Problems of energy and nature use 2013. – Budapest 2014. – С. 108 – 115.
15. Пічугін С.Ф. Розрахунок рівня надійності лінійної частини підземних магістральних трубопроводів / С.Ф. Пічугін, П.Ю. Винников // Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во)/ Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Вип. 1 (40). – Полтава: ПНТУ, 2014. – С. 109 – 119.

Пічугін Сергій Федорович, докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (050) 591-77-28. E-mail: pichugin_sf@mail.ru

Зима Олександр Євгенович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри Організації і технології будівництва та охорони праці Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (066) 140-35-07. E-mail: zymaee@gmail.com

Винников Пилип Юрійович, аспірант кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (067) 280-87-98. E-mail: vynnykov@yandex.ru

Pichugin Sergiy, doctor of technical sciences, professor, head of the “Steel, wooden and plastic constructions department” of Poltava Yuriy Kondratiuk National Technical University. Tel.: (050) 591-77-28. E-mail: pichugin_sf@mail.ru.

Zyma Olexandr, PhD., senior lecturer of the “[Department of organization and technology of building and health safety](#)” Poltava Yuriy Kondratiuk National Technical University. Tel.: (066) 140-35-07. E-mail: zymaee@gmail.com

Vynnykov Pylyp, post graduate of the “Steel, wooden and plastic constructions department” Poltava Yuriy Kondratiuk National Technical University. Tel.: (067) 280-87-98. E-mail: vynnykov@yandex.ru.

Стаття прийнята 21.04.2015 р