

Б.С. Білобран, А.Р. Дзюбик*, В.Б. Павлик
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра опору матеріалів,
*кафедра зварювального виробництва, діагностики
та відновлення металоконструкцій

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН НАФТОПРОВОДУ ПРИ ЙОГО ЛОКАЛЬНОМУ ПІДЙМАННІ

© Білобран Б.С., Дзюбик А.Р., Павлик В.Б., 2006

На основі розрахунку методом скінченних елементів напружено-деформованого стану трубопроводу розглядається задача його локального підймання за допомогою гідравлічного домкрату. Виконано моделювання геометрії спеціальних підкладок та визначено допустиму величину прикладуваних зусиль.

On the basis of computation by method of finite elements of tense-deformed state of pipeline a task of his local raising is considered by means hydraulic to the jack. A design of geometry of the special subspoons is executed and definite a possible size of efforts, that are put.

Постановка проблеми. У процесі діагностування або ремонту нафтопроводів, що перебувають в експлуатації, часто виникає необхідність у підйманні їхніх окремих ділянок. При цьому в багатьох випадках застосування спеціальних підймальних транспортних засобів є технічно складним або економічно невиправданим. Тоді використовують гідравлічні домкрати, на головки яких встановлюють спеціальні підкладки. Проте, у разі значних підймальних зусиль у зоні їхнього прикладання в трубах можуть виникати надмірні рівні напружень, що може призвести до переходу металу в пластичний стан або навіть утворення різноманітних дефектів типу вм'ятини, гофри, тріщини і т. д.

Тому важливим є питання про геометричні розміри підкладок та допустиму величину прикладених зусиль. Однак треба враховувати, що такі роботи переважно виконують вручну або з мінімальним ступенем механізації, тому бажано, щоб вага підкладок була якомога меншою. Саме ці питання розглянуто нижче на основі математичного моделювання із застосуванням методу скінченних елементів (МСЕ).

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Сьогодні для розв'язання таких задач у трубопроводному транспорті застосовують різноманітні експериментальні та розрахункові методи. Однак перші з них потребують випробувань на реальних конструкціях, є вартісними та не завжди достатньо інформативними через обмеженість методики або складність її реалізації в польових умовах [1]. Інші, розрахункові, переважно орієнтовані на застосування спеціального підймального устаткування. Вони мало придатні для дослідження напружень і деформацій за локального підймання труби із відповідним втисненням у неї спеціальної підкладки [2].

Постановка задачі. Числові дослідження проводилися для труб, що використовуються у магістральних нафтопроводах (ТУ 14-3-109 – 73, сталь 17Г1С, межа текучості 360 МПа, межа міцності 520 МПа). Значення густини матеріалу труби, $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$, модуль пружності $E = 206000 \text{ МПа}$ та коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$ вибиралися відповідно до рекомендацій СНиП 2.05.06–85.

За розрахункову схему (рис.1) прийнято жорстко закріплену на кінцях трубу завдовжки l , що знаходиться під дією внутрішнього тиску P і об'ємних сил від власної ваги труби та розподіленого по внутрішній поверхні труби навантаження від ваги нафти P_n (густина $\rho_n = 895 \text{ кг/м}^3$) з урахуванням зміни тиску по висоті перерізу.

Посередині прогону на трубу діє через сегментну підкладку сила підняття F . Дослідження виконано для труби завдовжки $L = 10 \text{ м}$, зовнішнім діаметром $D = 720 \text{ мм}$ та товщиною стінки

$\delta = 10$ мм, яка перебуває під внутрішнім тиском $P = 2$ МПа (товщина підкладки $\delta_0 = 12$ мм). Відповідно до принципу Сен-Венана тип закріплення труби на краях за вибраної довжини L не повинен вплинути на розподіл напружень у зоні прикладення підйімальної сили, що є основним предметом досліджень.

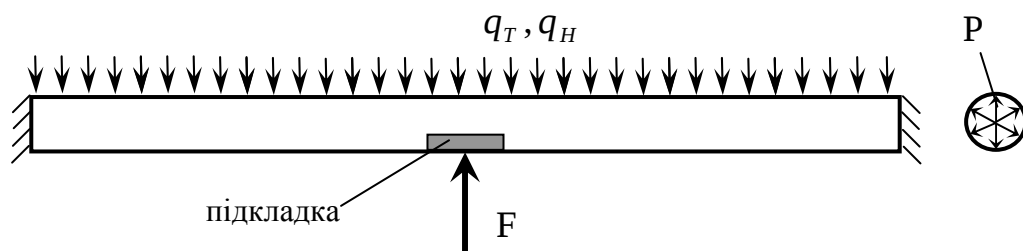


Рис. 1. Розрахункова схема підймання труби

Сітка скінченних елементів. Для дослідження напружено-деформованого стану вибраної розрахункової схеми геометрична модель труби розбивається на об'ємні складові елементи.

Як відомо, важливим етапом досліджень з застосуванням МСЕ є раціональний вибір розмірів сітки, від чого суттєво залежить як точність результатів, так і тривалість процесу обчислення [3–5]. За вихідну вибрано сітку розміром 60 мм з поступовим її зменшенням (табл. 1).

Таблиця 1

Дані про розбиття труби на сітку скінченних елементів

Тип сітки	Початкова	Уточнююча
Розмір елемента, мм	60	38
Допуск, мм	3	1.95
Кількість елементів	39080	91063
Кількість вузлів:	77405	180836

За результатами попередніх обчислень з'ясовано, що зменшення розмірів скінченних елементів за 38мм істотно не впливає на підвищення точності результатів. Тому основні числові дослідження проведено із застосуванням уточненого типу сітки з розмірами елементів 38 мм.

Розв'язання тестової задачі. Для перевірки достовірності отримуваних результатів із застосуванням програмного забезпечення МСЕ виконано низку тестових розрахунків. З цією метою для розрахункової схеми визначено напруження для двох окремих типів навантаження: а) дія тільки внутрішнього тиску $P = 2$ МПа ; б) одночасна дія внутрішнього тиску $P = 2$ МПа та ваги труби з нафтою.

Результати розрахунків для перерізу, що розташований посередині прогону, у верхній та нижній точках, для внутрішньої та зовнішньої поверхонь труби, наведено у табл. 2. З огляду на особливості геометрії моделі (об'ємні елементи), під поняттям “на поверхні” вважають значення напружень, яке можливо отримати в точках перерізу труби за максимального наближення до її поверхні. З метою порівняння, у таблиці також наведено значення напружень у відповідних точках, знайдених за формулами Ламе від дії внутрішнього тиску та за теорією згину балок від дії вагового навантаження [6].

Результати аналізу отриманих даних свідчать, що наявність гідростатичного тиску нафти практично не впливає на радіальні напруження. Навантаження труби вагою нафти та труби змінює тільки осьові напруження. Як бачимо, розбіжність результатів знаходиться в допустимих для інженерних розрахунків межах. Результати обчислень знаходяться в межах 5 % похибки. Останнє положення вказує на можливість використання програмного забезпечення МСЕ для дослідження напруженого стану трубопроводу.

Напружений стан труби при тестових розрахунках

Геометричне положення		Напруження, МПа						еквівалентні за критерієм Губера–Мізеса
		кільцеві		осьові		радіальні		
		МСЕ	переві- рочні	МСЕ	переві- рочні	МСЕ	переві- рочні	
відносно поверхні	відносно труби	внутрішній тиск нафти						
внутрішня	зверху	70,51	71,01	19,66	20,7	-1,9	-2,0	64,40
	знизу	70,62		19,79		-1,87		64,45
зовнішня	зверху	69,92	69,01	19,97	20,7	-0,09	0	62,16
	знизу	69,50		19,82		-0,20		62,2
		внутрішній тиск нафти, вага нафти, вага труби						
внутрішня	зверху	70,55	71,01	14,45	15,31	-1,79	-2,0	65,75
	знизу	70,85		25,07	26,09	-1,94		63,74
зовнішня	зверху	69,55	69,01	14,53	15,16	-0,21	0	63,69
	знизу	69,82		25,35	26,24	-0,13		61,33

Геометричні розміри підкладки для підіймання трубопроводу. Підкладку для підіймання нафтопроводу здебільшого виготовляють із сегмента труби цього ж діаметра, що трубопровід. Товщину підкладки вибирали із застосовуваних у нафтопроводному транспорті труб діаметром 720 мм. Оптимальні розміри добирали шляхом покрокового наближення до необхідної конфігурації підкладки – мінімально допустимі розміри при забезпеченні міцності.

Розрахунок прямокутної в плані підкладки показав, що її краї практично не навантажені та при підійманні не контактують із трубою. Тому для рівномірнішого завантаження підкладки та зменшення її маси надалі застосовували підкладку із заокругленими кряями.

Проведені розрахунки показали, що раціональнішим з точки зору забезпечення необхідної міцності труби за мінімальної маси є підкладка із такими розмірами: ширина 300 мм, товщина 12 мм, довжина 250 мм, радіус заокруглення 50 мм. Вага підкладки в цьому випадку становить приблизно 7 kg.

Напружено-деформований стан моделі. Для вибраних розмірів підкладки досліджено напружений стан системи «труба – підкладка» залежно від прикладеного навантаження для двох конструктивно можливих випадків: 1) підкладка вільно без тертя прилягає до труби; 2) підкладка утворює з тілом труби одне ціле. У розрахунковій моделі прийнято, що підймальна сила прикладається у центрі підкладки у вигляді рівномірно розподіленого навантаження по площі круга діаметром 50 мм. Зміну вздовж цієї нормалі еквівалентних напружень, обчислених за формулою Губера – Мізеса, при $F = 100$ кН для обох випадків показано на рис. 2.

Як показав аналіз результатів досліджень, незалежно від величини підймальної сили, найбільші напруження в трубі і підкладці виникають у точках нормалі, вздовж якої спрямована ця сила. Розподіл напружень за товщиною системи «труба – підкладка» має пилкоподібний характер із чітко вираженими екстремумами.

Зокрема, для першого конструктивного випадку, максимальні значення еквівалентних напружень у підкладці виникають на зовнішній поверхні у центрі області прикладання підймального зусилля. Найбільш напружена точка у трубопроводі знаходиться на зовнішній поверхні в місці контакту з підкладкою (327 МПа), а на внутрішній поверхні напруження становлять 305 МПа. На середній лінії труби та по-середині перерізу підкладки напруження досягають мінімальних значень на рівні 114 і 61 МПа відповідно.

На рис. 3 у вигляді графіків наведено результати обчислень найбільших еквівалентних напружень у трубі та підкладці для різних значень підймальної сили. Бачимо, що у розглядуваному випадку з точки зору роботи матеріалу підкладки у межах пружності та задоволення умови

$\max \sigma_e \leq 0,9\sigma_T$ підймальна сила не повинна перевищувати приблизно 60 кН. Перехід матеріалу підставки у пластичний стан із подальшим підвищенням сили дещо вплине на величину напружень у трубопроводі. Проте наближено можна прийняти, що для труби допустимою є підймальна сила 100 кН.

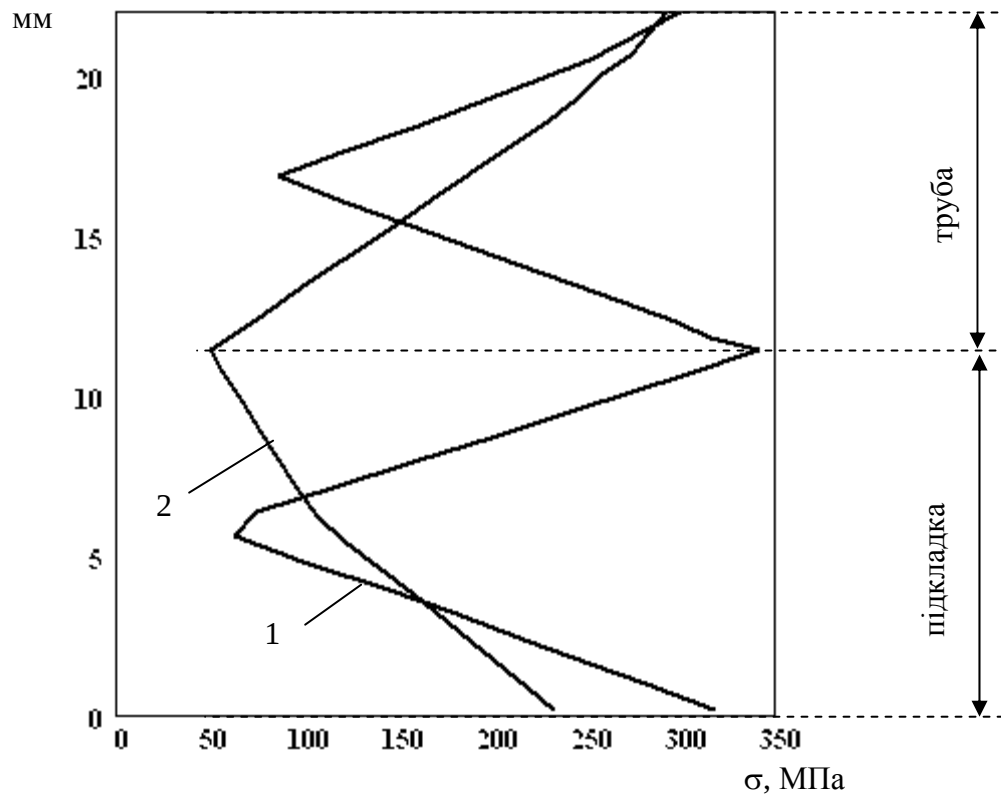


Рис. 2. Зміна напружень у перерізі моделі за різних умов контакту труби і підкладки:
1 – незалежне переміщення елементів; 2 – жорстке кріплення елементів між собою

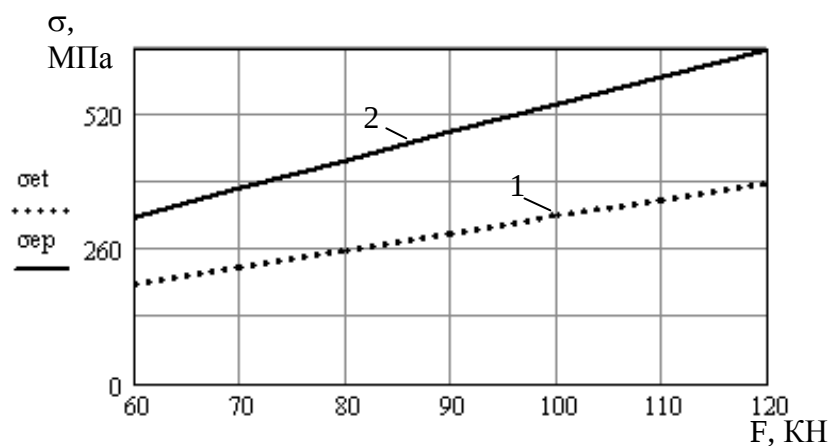


Рис. 3. Залежності найбільших еквівалентних напружень
у трубі (σ_{et} , МПа – лінія 1) і у підкладці (σ_{ep} , МПа – лінія 2) від підймальної сили F , кН

Значно вищих допустимих значень зусилля підймання можна досягти, якщо розглядати трубу та підкладку у вигляді одного цілого (другий конструктивний випадок). У реальних умовах максимально до цього можна наблизитися у випадку жорсткого кріплення або приварювання підкладки до труби. Для цього випадку результати обчислень найбільших еквівалентних напружень, які виникають на зовнішній поверхні в центрі прикладання навантаження, наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Напруження та переміщення в трубопроводі із жорстко закріпленою підкладкою

F, кН	60	70	80	90	100	110	120
$\max \sigma_c$, МПа	206	231	257	283	314	344	372
$f_{\max}$, мм	2,32	2,78	3,24	3,71	4,17	4,62	5,08

Як бачимо, величина допустимого зусилля підймання зростає практично вдвічі. Величина максимальних переміщень при цьому становить 4,17 мм проти 6,02 за незалежного переміщення підкладки та труби. Тобто внаслідок зростання жорсткості трубопроводу зменшується величина вминання труби від дії зусилля підймання.

Аналіз результатів показує, що окремі компоненти напружень можуть перевищувати межу текучості матеріалу.

Для збільшення зусилля підймання необхідним є конструювання підкладок складнішої конфігурації, що забезпечує вищу стійкість до деформування в процесі підймання та напружений стан в трубі не більший за $0,9 \cdot \sigma_T$. На рис. 4 показано загальний вигляд та конструктивні розміри такої суцільнолитой підкладки із плоскою основою. Тут ширина та довжина є аналогічна до вищенаведеної, а товщина змінюється за радіусом труби.

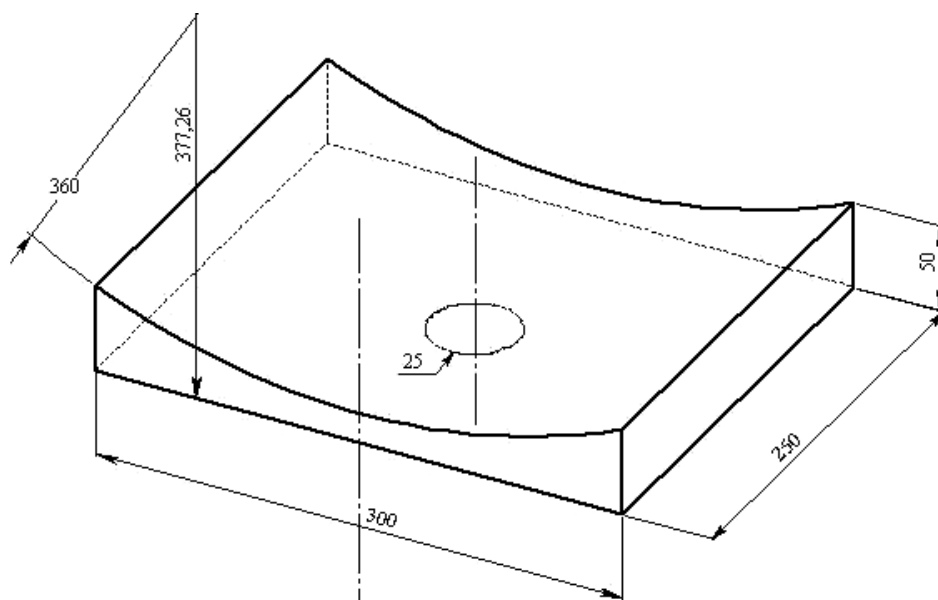


Рис. 4. Загальний вигляд суцільнолитой підкладки

Результати дослідження максимальних значень еквівалентних напружень для такої моделі наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Напруження та переміщення в системі “труба – суцільнолита підкладка”

P, кН	60	70	80	90	100	110	120
$\sigma_{\text{екв внутр}}$, МПа	155,1	170,4	185,8	201,2	216,6	232,0	247,4
$\sigma_{\text{екв зовн}}$, МПа	85,6	107,8	130,2	152,8	175,5	198,2	221,0
$f_{\max}$, мм	2,40	2,91	3,42	3,93	4,44	4,94	5,45
P, кН	130	140	150	160	170	180	190
$\sigma_{\text{екв внутр}}$, МПа	265,6	281,2	296,8	312,4	328,0	343,6	359,2
$\sigma_{\text{екв зовн}}$, МПа	240,3	262,8	285,3	307,8	330,3	352,8	375,3
$f_{\max}$, мм	5,962	6,47	6,978	7,48	7,995	8,504	9,012

Як бачимо, застосування нового типу підкладки дає змогу збільшити силу підймання. Аналіз отриманих результатів показує, що характер розподілу напружень за товщиною також є пилкоподібний. Однак чітко виражені екстремуми, а також максимальні значення спостерігаються у підкладці. Для труби характерною є більш плавна зміна напружень за товщиною, причому, залежно від величини зусилля підймання, максимальні значення спочатку спостерігаються на внутрішній стінці труби, а у разі значних зусиль – на зовнішній. Це можна пояснити поступовим перевищенням напружень, які спричинені підйнятною силою над напруженнями, що зумовлені внутрішнім тиском.

Висновки. Локальне підймання ділянок трубопроводу приводить до складного напруженого стану в його матеріалі. МСЕ дає змогу аналізувати цей характер та величину виникаючих напружень. Розроблено конструктивні розміри плоскої підкладки для підймання трубопроводу гідравлічним домкратом та проаналізовано умови її роботи. Встановлено, що для підкладки із розмірами 12×250×300 мм допустимим зусиллям підймання трубопроводу 720×12 мм є 100 КН. Показано, що жорстке кріплення підкладки до труби дає змогу збільшити зусилля підймання до 110 КН. У разі підймання трубопроводу виникають значні деформації вминання труби. Зміна напружень за перерізом має коливний характер із чітко вираженими екстремумами максимальних напружень в області контакту труби із підкладкою та області прикладання зусилля, а також мінімальних значень на середній лінії труби та посередині перерізу підкладки. Для збільшення зусилля підймання необхідним є конструювання підкладок складнішої конфігурації. Зокрема показано, що застосування жорсткішої суцільнолитой підкладки дає змогу збільшити зусилля підймання до 180 КН.

Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справочное пособие / Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, П.И. Полухин, Н.А. Чиченев. – К.: Наук. думка, 1981. – 584 с. 2. Перун И.В. Магистральные трубопроводы в горных условиях. – М.: Недра, 1987. – 175 с. 3. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/Nastran for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2003. – 448 с. 4. Алямовский А.А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с. 5. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Наука, 1975. – 392 с. 6. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів. – К.: Вища шк., 1993. – 655 с.