

За допомогою ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль представлено метод виявлення дефектів в стінках трубопроводів. Представлено числовий експеримент генерування, поширення та реєстрації ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль засобами скінченних елементів

Ключові слова: ультразвук, дефект, трубопровід, метод скінченних елементів, ультразвукова спрямована кільцева хвиля

С помощью ультразвуковых направленных кольцевых волн представлен метод обнаружения дефектов в стенках трубопроводов. Представлен численный эксперимент генерирования, распространения и регистрации ультразвуковых направленных кольцевых волн средствами конечных элементов

Ключевые слова: ультразвук, дефект, трубопровод, метод конечных элементов, ультразвуковая направлена кольцевая волна

Using ultrasonic circumferential waves presented method of crack detection in the walls of pipelines. Presented numerical experiment of generation, propagation and registration of ultrasound circumferential wave by means of finite elements

Key words: ultrasound, defect, pipeline, finite element method, ultrasonic wave circumferential wave

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ДОННИХ ДЕФЕКТІВ УЛЬТРАЗВУКОВИМИ СПРЯМОВАНИМИ КІЛЬЦЕВИМИ ХВИЛЯМИ

І.З. Лютак

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра програмного забезпечення автоматизованих систем

Івано-Франківський національний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, Україна, 76019

Контактний тел.: (03422) 4-60-77

E-mail: ihorlt@mail.ru

Вступ

Нафтогазопроводи в Україні мають велику протяжність та експлуатуються тривалий час. Тому розроблення нових методів неруйнівного контролю, які дозволять зменшити час безпосередніх вимірювань інформаційних параметрів та збільшити достовірність результатів є актуальними. До таких методів відносяться і ультразвуковий метод на основі використання спрямованих кільцевих хвиль.

Ультразвукові спрямовані кільцеві хвилі (УСКХ) в неруйнівному контролі застосовують для труб малого діаметру та товщини стінки [1, 2]. Група науковців на чолі із Л. Сатярнараяном з Індії досліджували хвильові властивості взаємодії УСКХ із дефектом прямокутної форми в стінці труби діаметром 169 мм [7]. Недоліком цієї роботи поряд із тим, що досліджується трубопровід із малим діаметром є те, що моди УСКХ збуджуються спеціальним ультразвуковим первинним перетворювачем (УПП) побудованим на основі фазованих антенних ґраток, що не дозволяє широко застосовувати запропонований вказаними науковцями підхід в Україні для контролю магістральних

нафтогазопроводів. Дисперсні параметри розраховуються спеціальним програмним забезпеченням, що не розраховане для геометричних розмірів магістральних трубопроводів. Науковці на чолі із Ю. Джіангонгом з КНР досліджували луно-імпульси УСКХ в трубопроводі діаметром 19 мм [8]. В результаті досліджень було встановлено явище трансформації мод при взаємодії із дефектом. Недоліком цієї роботи є те, що параметри луно-імпульсу визначаються на основі ортогонального розкладу в ряд поліному, що описує УСКХ. Дефект в роботі було змодельовано із розмірами, що дорівнюють товщині стінки труби. Такий підхід не може бути використаний для визначення луно-імпульсу УСКХ від дефекту в стінці труби із розмірами меншими ніж товщина стінки. Для неруйнівного контролю труб великого діаметру необхідно подальше дослідження властивостей ультразвукового поля УСКХ. Особливо важливо є виявлення донних дефектів в стінках труб великої товщини, оскільки є невизначеність щодо взаємодії поля УСКХ та берегів дефектів при утворенні луно-імпульсу.

Метою даного дослідження є розробити підхід для оцінки поля луно-імпульсу від дефекту УСКХ в

стінках труб великого діаметру, з яких складаються магістральні нафтогазопроводи, для побудови ефективного методу контролю дефектів.

Побудова моделі для обчислення поширення пружних коливань в стінці труби

Спрямовані кільцеві хвилі поширюються в стінці труби по її околу (рис. 1). У її формуванні беруть участь об'ємні хвилі (поздовжня та поперечна). Це дозволяє застосувати для опису поширення УСКХ базові фундаментальні хвильові рівняння на основі закону Ньютона та використати підхід розділу хвильових полів Хельмгольца. Для циліндричної системи координат із початком в середині труби результуючі рівняння опису поширення УСКХ в диференційній формі будуть такими [3]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + k_l^2 \varphi = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + k_t^2 \psi = 0,$$

де r, θ, z – осі циліндричної системи координат; φ, ψ – відповідно рівняння, що описують поздовжню та поперечну хвилі; k_l, k_t – відповідно хвильові числа поздовжньої та поперечної хвиль.

Розв'язок (1) є складним і залежить від граничних умов та геометричних розмірів досліджуваного об'єкту. Для розв'язку (1) скористаємось методом скінчених елементів реалізованих в пакеті програм Abaqus [4]. Даний пакет програм реалізує рішення таких диференційних рівнянь поширення пружних коливань:

$$[M] \times \{u''\} + [C] \times \{u'\} + [K] \times \{u\} = F(t), \tag{2}$$

де $\{u''\}, \{u'\}, \{u\}$ – відповідно вектори прискорення, швидкості та переміщення вузлів скінчених елементів пластини; $[M]$ – матриця маси; $[C]$ – матриця демпфування; $[K]$ – матриця жорсткості; $F(t)$ – вектор навантаження.

У (2) матриця маси фактично описує розподіл матеріалу у відповідності до заданої форми досліджуваного об'єкту і додатково залежить від його густини. Матриці демпфування та жорсткості описують фізико-механічні властивості матеріалу. Перевагою застосування (2) над (1) є можливість моделювати просторову зміну фізико-механічних властивостей матеріалу на параметри поширення спрямованої ультразвукової хвилі. Розв'язок (2) отримуємо у двовимірному просторі з розділенням окремих компонент векторів прискорення, переміщення та напруження, що дозволяє уникнути додаткових математичних перетворень для розділення полів поздовжньої та поперечної хвиль. Це робить можливим дослідження параметрів УСКХ як суперпозиції об'ємних хвиль.

Для генерування УСКХ застосуємо підхід представлений І. Вікторовим, у якому описується співвідношення між довжиною об'ємної ультразвукової хвилі та товщиною середовища поширення. Хоча І. Вікторовим описано утворення хвиль Лемба в пластині, базове визначення моди ультразвукової хвилі стосується також і всіх ультразвукових спрямованих хвиль, в тому числі і кільцевих спрямованих хвиль. Умова утворення УСКХ є такою [9]:

$$2h = \frac{\lambda_l}{2}, \frac{3\lambda_l}{2}, \frac{5\lambda_l}{2}, \dots \quad 2h = \frac{\lambda_t}{2}, \frac{3\lambda_t}{2}, \frac{5\lambda_t}{2}, \dots, \tag{3}$$

$$2h = \lambda_{(0)}, 2\lambda_{(0)}, 3\lambda_{(0)}, \dots,$$

де λ_l, λ_t – відповідно довжини поздовжньої та поперечної хвиль; h – половина товщини стінки труби.

Для утворення УСКХ в моделі стінці сегмента труби застосуємо умову (3) до границі розділу 6, рис. 1.

Для спрощення обчислення представимо модель сегмента труби у двохмірному просторі. У цьому випадку форма середовища поширення пружних коливань на площині має форму перерізу стінки труби січною площиною перпендикулярною до осі трубопроводу. Граничні умови задаються вільними, компоненти напруження нормальні до границь розділу середовищ на зовнішній та внутрішній поверхнях, берегах дефекту та кінці сегменту труби дорівнюють нулю. Такі граничні умови дозволяють описати пружні коливання, що розподілені по всій товщині стінки труби.

Обчислення проведемо на сегменті труби діаметром 1020 мм та товщиною стінки 16 мм (рис. 1). Розміри дефекта є такими ширина 2 мм, глибина 7.2 мм. Форму дефекту в наближенні виберемо прямокутною на основі підходу Ч. Жанга для забезпечення відносної простоти моделювання та твердження, що взаємодія такого типу дефекту із ультразвуковою хвилею дає достатню інформацію про луно-сигнал, яку можна використати для реальних дефектів [10].

Розв'язок рівняння, що описує метод скінчених елементів отримуємо з розділенням окремих компонент векторів прискорення, переміщення та напруження, що дозволяє уникнути додаткових математичних перетворень для розділення полів поздовжньої та поперечної хвиль. Це робить можливим дослідження окремих параметрів поширення пружних коливань в стінці труби та утворення УСКХ.

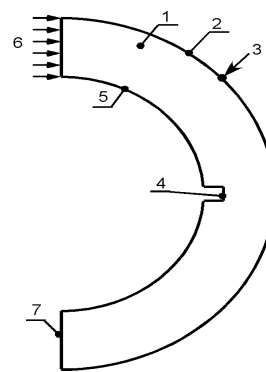


Рис. 1. Сегмент труби для проведення моделювання поширення ультразвукових коливань: 1 – сегмент труби; 2 – зовнішня поверхня; 3 – місце реєстрації луно-імпульсу; 4 – дефект; 5 – внутрішня поверхня; 6 – збуджуючий сигнал $F(t)$, (t – час); 7 – кінець сегменту труби

Збуджуючий сигнал $F(t)$ змодельуємо як коливання чутливого елемента п'єзоперетворювача за гармонічним законом так:

$$F(t) = A \sin(\omega_0 t), \tag{4}$$

де A – амплітуда сигналу, ω_0 – кутова частота сигналу.

В силу інерційних процесів ультразвуковий первинний перетворювач максимальну амплітуду коливань дає через певний час, який відповідає кільком періодам. Для врахування інерційних процесів в рівнянні (4) амплітуду сигналу A визначимо як функцію $A = A(t)$, при цьому гармонійна складова коливання $\sin(\omega_0 t)$ змінюватись не буде. Припустимо, що збуджуючий сигнал складається із 5-ти періодів з максимальною амплітудою в третьому періоді, що властиво для типового збудження пружних коливань представлених, наприклад, в праці [8].

Для збудження пружних коливань ширококутовим первинним перетворювачем із центральною частотою 2.5 МГц із врахуванням, що амплітуда A в (4) збуджуючого сигналу наростає до максимального значення та загасає до нуля за час, що дорівнює 5-ти коливанням гармонійної складової, запишемо таке рівняння:

$$F(t) = \begin{cases} A_0 \sin(\omega_0 t/10) \sin(\omega_0 t), & 0 < t \leq 1.8E-6, \\ 0, & 1.8E-6 < t \leq 2.0E-6, \end{cases} \quad (5)$$

де A_0 – максимальна амплітуда.

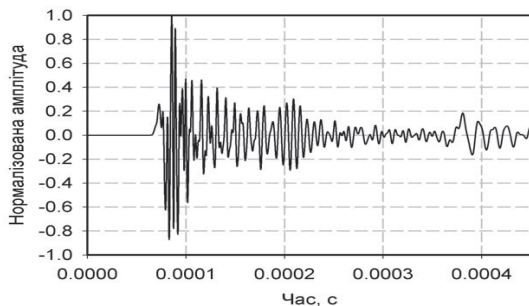


Рис. 2. Сигнал нульової моди ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі у зразку з дефектом

Частота дискретизації $F(t)$ залежить від результатів сходження алгоритму обчислення поширення ультразвукових коливань. Тривалість кроку обчислення була вибрана плаваючою для зменшення часу розрахунків. З метою забезпечення рівномірної дискретизації результатів на виході алгоритму було застосовано згладжуючий фільтр.

Амплітуда сигналу на відрізку між заданими точками дискретизованого збуджуючого сигналу розраховувалась так [4]:

$$a = A_i + (A_{i+1} - A_i) \xi^3 (10 - 15\xi + 6\xi^2), \quad (6)$$

$$\xi = (t - t_i) / (t_{i+1} - t_i),$$

де t_i, t_{i+1} – відповідно час точок дискретизації; t – час у проміжку $[t_i, t_{i+1}]$; A_i, A_{i+1}, a – відповідно амплітуди збуджуючого сигналу у точках часу t_i, t_{i+1}, t .

Рівняння (6) апроксимує результати тільки між двома точками в часі. Тому для точного представлення збуджуючого сигналу необхідно забезпечити більш щільну дискретизацію сигналу, ніж визначено з теорії обробки сигналів. Час t вибирається на апроксимованому інтервалі часу виходячи із умови сходження результатів розрахунку. При збільшенні похибки розрахунку за задану величину час t зменшується.

Для врахування демпфувальних характеристик ультразвукової хвилі, що поширюється в сталі вибрано модель Релея із коефіцієнтом демпфування за масою $\alpha_R = 0.001 \text{ c}^{-1}$ та демпфуванням за жорсткістю

$\beta_R = 1 \cdot 10^{-9} \text{ c}$ [2, 3]. Коефіцієнт демпфування за масою впливає на значення абсолютних швидкостей і пропорційний масі елемента. Коефіцієнт β_R впливає на швидкість зміни деформації в системі і характеризує тип матеріалу. Фактично демпфування за жорсткістю обчислюється шляхом додавання додаткових напружень [4]:

$$\sigma_d = \beta_R [K] \epsilon, \quad (7)$$

де σ_d – додаткове напруження від демпфування, ϵ – деформації.

Напруження σ_d враховуються тільки на етапі обчислення пружного відгуку системи в точках інтегрування при формуванні рівнянь динамічного балансу і не вносяться до результатів обчислення сумарного напруження в скінченних елементах.

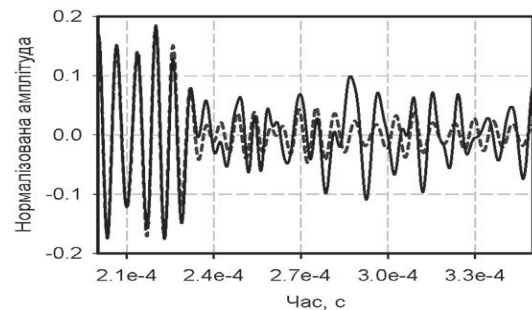


Рис. 3. Сигнали ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль: суцільна лінія – сигнал в зразку з дефектом, штрихова – без дефекту

Проведення розрахунку поширення пружних коливань в стінці труби

Параметри сталі сегменту труби є такими: густина 7850 кг/м^3 , модуль Юнга $2.1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, коефіцієнт Пуассона 0.3. У зв'язку з тим, що генеруються коливання малої амплітуди параметри сталі в зоні пластичності не задавались. На верхніх гранях досліджуваного сегменту труби записувались зміни компонентів прискорень при проходженні пружних коливань. Експеримент проводився для двох випадків. У першому випадку моделювалось поширення ультразвукової хвилі в досліджуваному сегменті без дефекту. У другому випадку з дефектом (рис. 1).

Результати обчислення, (рис. 2), показують наявність кількох типів пружних хвиль із різними швидкостями поширення. Оскільки пружні коливання поширюються по всій товщині стінки труби із швидкостями відмінними від поздовжніх та поперечних ультразвукових хвиль, вважаю, що є присутніми моди УСКХ. В стінці труби після закінчення зондуєчого імпульсу поверхня контакту п'єзоперетворювач – метал в силу інерційних процесів може відтворювати загасаючі коливання, які інтерпретуються як завади, що яскраво видно на сигналі в період часу $2.2 \cdot 10^{-4} \text{ c} \dots 3.6 \cdot 10^{-4} \text{ c}$.

Амплітуда сигналу (рис. 2) нормалізувалась шляхом ділення сигналу на своє максимальне значення. Місце реєстрації коливань розташоване на куті 45° по околу труби на її поверхні. В цьому випадку відстань від місця генерування УСКХ та від дефекту є однаковою.

З рис. 2, видно, що найбільше енергії коливань зосереджено у тій частині хвилі, що йде за фронтом. Після максимуму коливань енергія хвилі поступово зменшується з часом. Проте, в кінці прямого сигналу (0.2 мс) спостерігається збільшення амплітуди, що може відповідати додатковому джерелу коливань. В кінці розглянутого часового проміжку (0.38 мс) спостерігається збільшення амплітуди, що утворюється відбитою пружною хвилею від кінця сегменту 8 (рис. 1).

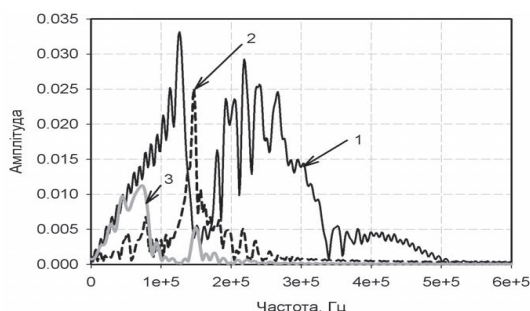


Рис. 4. Спектр ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі у зразку з дефектом: 1 – частина сигналу до взаємодії з дефектом, 2 – частина сигналу від взаємодії з дефектом, 3 – частина сигналу відбитого від другого кінця зразка

При порівнянні розрахованих форм хвиль, що поширюються в досліджуваному зразку з дефектом та без нього у діапазоні часу приведенного на рис. 3, спостерігається значна різниця в амплітудах. Деякі частини сигналу є в протифазі, що може бути пояснено відбиттям хвиль від берегів дефекту.

Для подальшого аналізу сигналу пружних хвиль (ПХ), що поширюється в зразку з дефектом, його було розділено на три частини. Перша частина розділеного сигналу формувалась із тієї частини загального, що відповідає часу поширення ПХ від місця генерування до дефекту та зворотного шляху до місця реєстрації. Решта розділеного сигналу заповнювалась нулями таким чином, щоб довжина розділеного сигналу містила таку ж кількість точок вибірки, що і загальний сигнал. Другий розділений сигнал формувався із загального на час проходження луно-імпульсу від дефекту через місце запису до початку відбитого сигналу від кінця зразка. Початок та кінець другого розділеного сигналу заповнювався нулями. Третій розділений сигнал містить частину ПР, що відбита від другого кінця зразка. Початок цього сигналу заповнений нулями. Це дозволяє порівнювати результати аналізу в частотній області трьох розділених сигналів (рис. 4).

У результаті порівняння величин спектрів (рис. 4) трьох частин сигналу ПР можна зробити висновок про значну амплітуду тієї частини сигналу, яка формувалась хвилею, що утворена дефектом. Оскільки ПР, що взаємодіє із дефектом поширена по всій товщині стінки труби, вважаю, що луно-імпульс утворений УСКХ. Це вказує на перспективність застосування цих хвиль для контролю дефектів в стінках магістральних трубопроводів.

Із частотного аналізу (рис. 4) можна побачити, що луно-імпульс від дефекту відрізняється від іншої частини сигналу УСКХ своїм частотним діапазоном, він має пікову форму. Це дозволяє стверджувати, УСКХ розподілена по товщині стінки неоднорідно в частотному діапазоні, а тому присутність донного дефекту

вносить вплив не однаково на всі частини сигналу УСКХ.

Висновки

Проведені дослідження взаємодії ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль із донними дефектами в стінках магістральних трубопроводів показали їх дієвість при застосуванні у неруйнівному контролі. Результати обчислення моделі поширення ультразвукових хвиль показали, що кільцеві моди нерівномірно розташовані по товщині стінки трубопроводу в частотному діапазоні, що дозволяє розробляти нові методи обробки сигналів луно-імпульсів для контролю дефектів.

Подальшим напрямком досліджень є підвищення точності контролю ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями дефектів в стінках магістральних нафтогазопроводів.

Література

1. J. Fong. Fast techniques for calculating dispersion relations of circumferential waves in annular structures / J. Fong, M.J.S. Lowe, D. Gridin, R.V. Craster // Review of Progress in Quantitative NDE (American Institute of Physics).- 2003.- № 22.- P. 213-220.
2. H. Nishino. Simple method of generating for circumferential shear horizontal waves in a pipe and their mode identifications / H. Nishino and K. Yoshida. // Acoustical Science and Technology.- 2006.- Vol. 27.- № 6.- P.389-392.
3. Лютак І. З. Побудова та обчислення математичної моделі поширення кільцевих мод в трубопроводі спрямованими хвилями в ультразвуковому діапазоні частот [Текст] / Ігор Лютак // Технічна діагностика і неруйнівний контроль. - 2009.- № 2.- С. 30-35.
4. Документація на пакет програм скінченно-елементного аналізу Abaqus [електронний ресурс]: версія 6.9.1 / Компанія Simulia.- 2009.- 1 електронний оптичний диск (DVD-ROM).- Системні вимоги: Windows XP.- Назва з титул. екрану.
5. Greve. D. W. Excitation of Longitudinal and Lamb Waves in Plates by Edge-Mounted Transducers [Текст]/ Greve D.W., Peng Zheng, Oppenheim I. J. // Ultrasonics Symposium. IEEE.- New York.- 2007.- P. 1120 – 1123.
6. Документація на пакет математичних програм Matlab [Електронний ресурс]: версія 2009 / Компанія MathWorks.- www.mathworks.com, 2009.- 1 електронний оптичний диск (DVD-ROM).- Системні вимоги: Windows XP.- Назва з титул. екрану.
7. L. Satyarnarayana. Circumferential higher order guided wave modes for the detection and sizing of cracks and pinholes in pipe support regions / L. Satyarnarayana, J. Chandrasekara, Bruce Maxfield, Krishnan Balasubramaniam // NDT & E International.- 2008.- Volume 41.- Issue 1.- p. 32-43.
8. Yu Jiangong. Guided circumferential waves in orthotropic cylindrical curved plate and the mode conversion by the end-reflection / Yu Jiangong, Wu Bina, He Cunfua // Applied Acoustics.- 2007.- Volume 68.- Issue 5.- p. 594-602.

9. И. А. Викторов. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. / И. А. Викторов.- Москва: Наука.- 1966.- 168 с.
10. Ch Zhang. On Wave Propagation in Elastic Solids with Cracks (Advances in Fracture Mechanics) / Ch. Zhang, D. Gross.- Southampton: Computational Mechanics, 1997.- 272 p. - ISBN: 978-1853125355.

В роботі дістала подальшого розвитку модель задачі оптимізації змісту проекту за строками і вартістю його виконання при наявності обмежень на якість продукту після виконання певних етапів проекту, також створено метод розв'язання цієї задачі з використанням узагальненого алгоритмічного критерію

Ключові слова: проект, утримання, двохкритеріальна оптимізація, час, вартість, якість

В работе получила дальнейшее развитие модель задачи оптимизации содержания проекта по срокам и стоимости его выполнения при наличии ограничений на качество продукта после выполнения определенных этапов проекта, а также создан метод решения этой задачи с использованием обобщенного алгоритмического критерия

Ключевые слова: проект, содержание, двухкритериальная оптимизация, время, стоимость, качество

The paper describes further development of the model of a project content optimization problem where fulfillment of project deadline and costs of its implementation is required. The model includes constraints on quality of a product after completion of certain stages of the project. The paper also describes the method that was created to solve this problem using a generalized algorithmic criterion

Key words: project, content, two-criterion optimization, time, cost, quality

УДК 658.012.23

ДВУХКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ ПРОЕКТА ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА КАЧЕСТВО ПРОДУКТА

И. В. Кононенко

Доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой
Контактный тел.: 707-67-35

И. В. Протасов*

*Кафедра стратегического управления
Национальный технический университет «Харьковский
политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Традиционно формирование содержания проекта осуществляется на эвристическом уровне. Часто работы или комплексы работ включаются в состав проекта без глубокого анализа их влияния на другие работы. Количество рассматриваемых альтернатив при этом, как правило, невелико. Данная ситуация объясняется большой трудоемкостью анализа альтернативных вариантов работ или их комплексов в многоэтапных проектах. В работе [1] предложены модель и метод оптимизации содержания проекта с точки зрения времени его выполнения. В работе [2] рассматриваются модель и метод оптимизации содержания проекта по критерию затраты на его осуществление при наличии

ограничений на сроки. В работе [3] впервые предложена многокритериальная модель задачи оптимизации содержания проекта по критериям время и стоимость при наличии альтернативных вариантов выполнения работ или их комплексов, заданных в виде сетевых моделей. Для решения многокритериальной задачи предложено использовать минимаксный подход. Однако, часто лица, принимающие решения, предпочитают формировать содержание проекта, задавая веса целевым функциям. При этом в качестве ограничительных необходимо учитывать требования к показателям качества продукта после выполнения определенных этапов проекта.