

# УТВОРЕННЯ КРАЙОВИХ ХВИЛЬ ВІД НАПІВПРОЗОРИХ ТРИЩИН

В.П. Дядін, Є.О. Давидов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [davudov7764@gmail.com](mailto:davudov7764@gmail.com)

Стаття розглядає особливості утворення хвиль дифракції на краях тріщин, внутрішня порожнина яких заповнена рідиною. Актуальність такого дослідження продиктована практикою застосування методу TOFD. Зазвичай поверхня промислових об'єктів досить часто контактує з різними рідинами. Наприклад, до таких об'єктів відноситься практично все нафтохімічне та теплоенергетичне обладнання. Частина обладнання в робочому циклі змащується маслом або просто працює в умовах атмосферних опадів або в умовах, коли змочування поверхні не можна виключити. Тому питання про те, як впливає рідина на утворення крайових хвиль від тріщин, заповнених рідиною, становить певний інтерес. Бібліогр. 6, рис. 13.

*Ключові слова:* крайова хвиля, дифракція хвиль, метод TOFD, тріщина

**Вступ. Фізичний опис проблеми.** Термін «дифракція», «дифракція хвиль» має різні фізичні трактування, які на перший погляд суттєво відрізняються один від одного. Тож для розуміння самої проблеми доцільно якісно пояснити фізичний механізм дифракції. Спочатку явище дифракції трактувалося як огинання хвилею перешкоди, тобто проникнення хвилі в область геометричної тіні (рис. 1). З променевої моделі поширення світла (історично так, а у широкому значенні – поширення збурювання) впливає, що промені *I*, що падають на екран *3* перпендикулярно, не можуть потрапляти в область тіні *2*. Границя між світлом і тінню є завжди різкою. Якщо розглядати похідну амплітуди у напрямку поперек поширення променів, то на межі світло-тінь вона дорівнюватиме нескінченності. Нескінченність – це математична абстракція, а на практиці це означає досягнення границі моделі, що розглядається, і необхідність зрозуміти та запропонувати новий механізм або нову модель, яка правдоподібно пояснює реальність за досягнутою межею. Крім того, відносно прості спостереження та експерименти доводять, що за екран в область тіні проникає збурення, яке не можна списати на різні помилки експерименту.

Першу хвильову теорію явища дифракції надано Томасом Юнгом. Юнг припустив, що є передача амплітуди коливань, поперечна до напрямку поширення хвилі, тобто хвиля поширюється не тільки перпендикулярно хвильовому фронту (променю), а й вздовж нього. Швидкість цієї передачі (потік амплітуди) є пропорційним довжині хвилі та відмінності в амплітуді (градієнту) по фронту. За Юнгом дифрагована хвиля виникає локально у певній області границі геометричної тіні за краєм перешкоди. Цілком симетрично дифрагована хви-

ля утворюється і в «освітленій» області простору, тобто край перешкоди є джерелом циліндричних хвиль [1]. Спрощену геометричну інтерпретацію сказаного вище показано на рис. 2.

Крайові хвилі на рис. 2 показані як кола. Їх утворення можна пояснити вже з моделі Гюйгенса-Френеля, де хвильову картину утворює кожне вторинне джерело випромінювання, тобто границя екрану стає граничною точкою, від якої і виходить крайова хвиля. Насправді джерелом крайової хвилі є фронт, обірваний екраном. На рис. 2 таких фронтів два – 4.1 та 4.2 і від кожного з країв

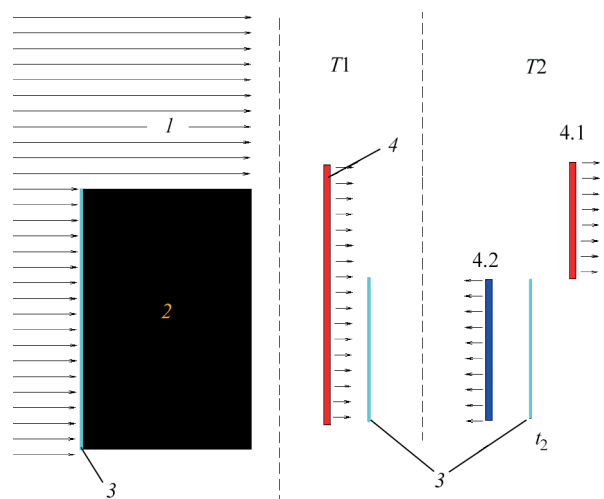


Рис. 1. Утворення тіні за екраном у промєневій моделі поширення світлових хвиль (загалом – будь-яких хвиль). Передбачається, що відбита хвиля 4.2 має протилежну фазу в порівнянні з падаючою хвилею 4 (м'яка, вільна границя або гранична умова Діріхле), що зазначено на рисунку кольором: *I* – промені поширення світла (збурення); *2* – тінь від екрану, де відсутні промені; *3* – непрозорий екран; *4* – фронт падаючої хвилі; *T1* – момент падіння фронту *4* на екран *3*; *T2* – фронт хвилі *4* після падіння на екран *3* – частина фронту 4.1 без будь-яких змін продовжує рух у попередньому напрямку, а частина фронту 4.2 відбивається в протилежному напрямку

В.П. Дядін – <https://orcid.org/0000-0002-2061-8436>, Є.О. Давидов – <https://orcid.org/0000-0003-3470-2329>

© В.П. Дядін, Є.О. Давидов, 2023

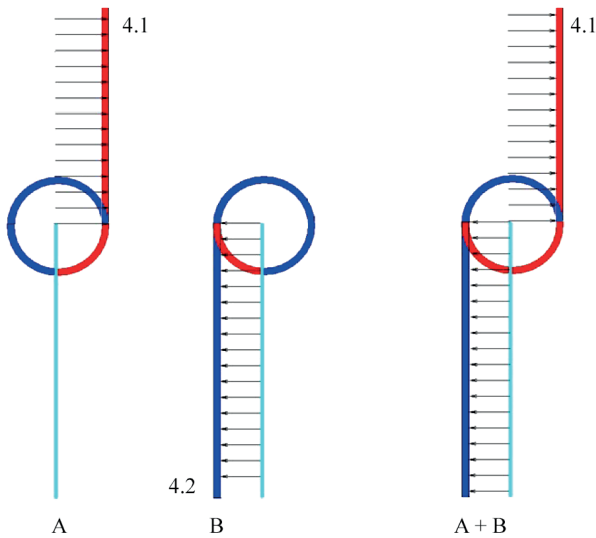


Рис. 2. Геометрична інтерпретація утворення крайової хвилі, кольором позначені фази хвиль: А – утворення дифрагованої хвилі від краю фронту, що пройшов за екран фронту 4.1; В – утворення дифрагованої хвилі від краю відбитого від екрану фронту 4.2; А+В – результат падіння фронту хвилі 4 на екран (рис. 1)

виходить дифрагована хвиля. При цьому частина енергії падаючої хвилі трансформується в енергію крайової або крайових хвиль з урахуванням, що на межі розривів фронтів 4.1 та 4.2 утворюються дві крайові хвилі. Фізична природа цього явища була вказана Юнгом, а її спрощений математичний виклад можна уявити наступним чином:

Розглянемо плоску хвилю  $u = A(x, y, z) \cdot \exp(-i(\omega t - kz))$ , де  $A$  – амплітуда хвилі;  $x, y, z$  – координати;  $\omega$  – кругова частота;  $k$  – хвильове число;  $t$  – час.

Якщо у хвильове рівняння  $\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = c^2 \cdot \Delta u$  підставити формулу плоскої хвилі, то отримаємо наступне рівняння:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - \frac{i\lambda}{4\pi} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = \frac{i\lambda}{4\pi} \cdot \left( \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right)$$

Для плавної зміни  $A$ , принаймні починаючи з деякого значення  $\lambda$ , можна знехтувати другим членом у лівій частині рівняння:

$$\frac{\partial A}{\partial z} \approx \frac{i\lambda}{4\pi} \cdot \left( \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

Це рівняння, яке називають рівнянням Леонтовича, показує зв'язок градієнта амплітуди за напрямом поширення хвилі з амплітудою фронту (амплітуда фронту на момент його перебування у точці  $z$  описується координатами  $x, y$ ). Можна уявити координату  $z = c \cdot t$  та отримати рівняння (1) у вигляді (2), яке добре відоме як рівняння дифузії.

$$\frac{\partial A}{\partial t} \approx \frac{i\lambda c}{4\pi} \cdot \left( \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) = D \cdot \left( \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

Тому часто крайову хвилю називають наслідком поперечної дифузії амплітуди із місця розриву фронту хвилі. При цьому слід звернути увагу на те, що дифузія в область тіні створює хвилю в області світла, протилежну за амплітудою. На рис. 2 цю особливість відзначено кольором. Для хвиль напруги сказане є практично очевидним: у місці утворення хвилі стиснення має утворитися хвиля розтягування, сила дії дорівнює силі протидії. Кількісну залежність дифрагованих хвиль від окремої межі світло-тінь можна визначити, наприклад, таким чином [2]:

$$u_{\text{диф}} = \pm u^r W \left( \vartheta \sqrt{\frac{kr}{\pi}} \right) \cdot e^{i(\omega t - kr)}$$

де  $u^r$  – амплітуда хвилі у місці розриву фронту;  $k$  – хвильове число;  $\omega$  – кругова частота;  $t$  – час;  $\vartheta, r$  – циліндричні координати розглянутої точки щодо краю екрана (вершини тріщини), кут  $\vartheta$  відраховується від напрямку первинної хвилі.

$W(z) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \Psi \left( \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{i\pi z^2}{2} \right)$ , де  $\Psi \left( \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{i\pi z^2}{2} \right)$  – вироджена гіпергеометрична функція. Графік функції  $W(z)$  показаний на рис. 3.

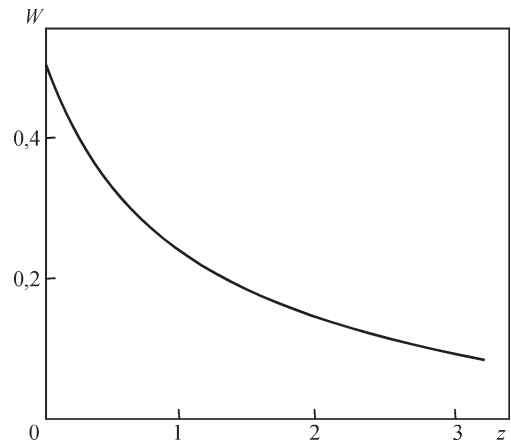


Рис. 3. Кількісне визначення функції  $W(z)$

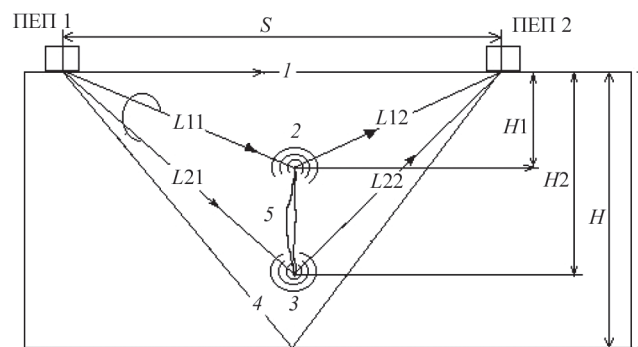


Рис. 4. Схема контролю за методом TOFD: 1 – поздовжня поверхнева хвиля; 2, 3 – крайові хвилі від меж тріщини 5; 4 – променевий шлях «донної» хвилі; 5 – тріщина; ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач;  $L_{11}, L_{21}, L_{12}, L_{22}$  – відстані від вершин тріщини до перетворювачів;  $H_1 = f(L_{11}, L_{12}, S)$ ,  $H_2 = f(L_{21}, L_{22}, S)$

На рис. 4 представлено типову схему методу TOFD.

Для успішної роботи за методом TOFD достатньо вміти виявляти крайові хвилі від вершин тріщини. Амплітуда сигналів має значення лише з погляду їх достовірного виявлення та вимірювання часу приходу (див. [3–5]). Як було розглянуто вище, амплітуда хвилі від краю екрана має цілком певну кількісну залежність, яку можна було б використовувати для сепарування сигналів та їх точнішої ідентифікації, але поки що такий підхід не реалізовано. Частково це пояснюється тим, що тріщини не є аналогом екрана або клину в розрахункових моделях. Реальні тріщини досить сильно відрізняються від своїх математичних моделей. Наприклад, на рис. 5 показано тріщину, яка утворилася внаслідок силового впливу. Насправді така гілляста тріщина може виникати тільки за особливих умов і не є типовою. Зазвичай втомні тріщини мають чітко виражені межі.

Для аналізу та оцінки геометрії тріщин корисно уявляти, хоча б якісно, як змінюються хвилі дифракції від тріщин, які відрізняються від розрахункових еталонних моделей. Найпоширенішою відмінністю є тріщина, заповнена рідиною. Таких тріщин досить багато, тому



Рис. 5. Приклад тріщини, яка не відповідає розрахунковим математичним моделям

що рідина, одного разу потрапивши в тріщину, може зберігатися там дуже довго. Рідина утримується всередині тріщини силами поверхневого натягу, а процес випаровування без спеціальних умов відбувається повільно. З погляду розглянутого механізму дифракції така тріщина є напівпрозорою, де фронт розриву матиме менший градієнт проти тріщини без рідини. Якісно це можна пояснити так. За відсутності механізму дифракції падіння плоскої хвилі на ідеальний екран (рис. 2) створювало б градієнт амплітуди хвилі в точці екрана, що дорівнює нескінченності, але в реальності, як впливає з рівнянь (1)–(2), наявність градієнта викликає поперечну дифузію і цим купірується розрив поля. Градієнт матиме певне значення, а величина градієнта характеризуватиме швидкість поперечної дифузії і, власне, амплітуду крайової хвилі. У тому випадку, коли екран напівпрозорий, спочатку градієнт має кінцеве значення і тому дифузія не така значна в порівнянні з непрозорим екраном. Очевидно, що в граничному випадку (для екрана, що повністю прозорий), ніякої дифракції відбуватися не буде і крайова хвиля не виникне.

Виходячи з цього пояснення, можна зрозуміти, що утворення крайової хвилі відрізнятиметься від випадків тріщини без рідини та з рідиною. Зрозуміло, що за наявності рідини похідна  $dA/dz$  матиме меншу величину, ніж без рідини. На рис. 6 показано результати проходження хвилі через шар рідини [6].

На рис. 6  $q = \rho_2 \cdot c_2 / \rho_1 \cdot c_1$ ; де  $\rho_1, \rho_2$  – густини середовища та шару відповідно;  $c_1, c_2$  – швидкості в середовищі та шарі відповідно;  $h$  – товщина шару;  $\lambda_2$  – довжина хвилі у шарі.

Як впливає з рис. 6, амплітуда хвилі, що пройшла, залежить від тріщини шару  $h$  і тому є також фактором, від якого залежить кінцевий результат – утворення хвилі дифракції.

**Опис моделі дослідження.** Моделювання утворення крайових хвиль виконувалося на наступній моделі. Геометрію моделі показано на рис. 7. Тріщину імітував клин із розкриттям 0,02 мм та за-

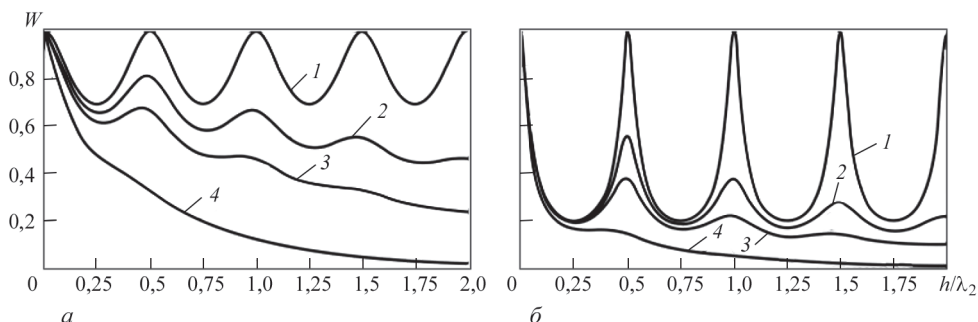


Рис. 6. Залежність модуля коефіцієнта проходження звуку через шар з поглинанням від товщини хвильової шару  $h/\lambda_2$  при нормальній падінні хвилі  $\delta$ : 1 – 0; 2 – 0,05; 3 – 0,1; 4 – 0,3;  $a - q = 2,5$ ;  $b - q = 10$ ;  $\delta$  – просторовий коефіцієнт згасання

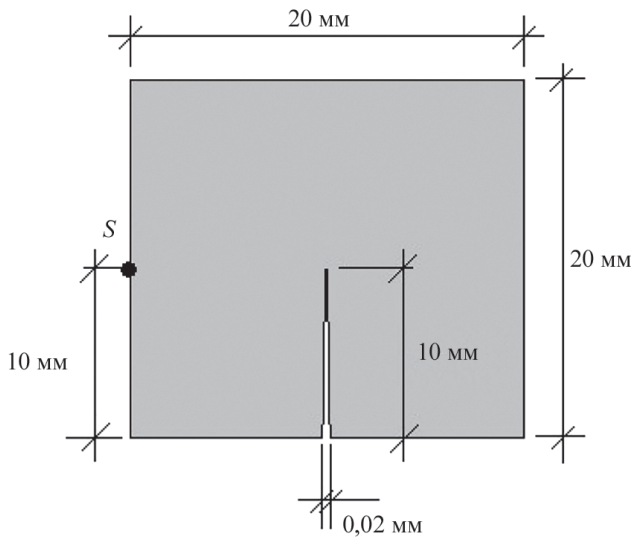


Рис. 7. Геометричні характеристики досліджуваної моделі:  $S$  – точкове джерело випромінювання з основною частотою 3 МГц, форма дії показана на рис. 8

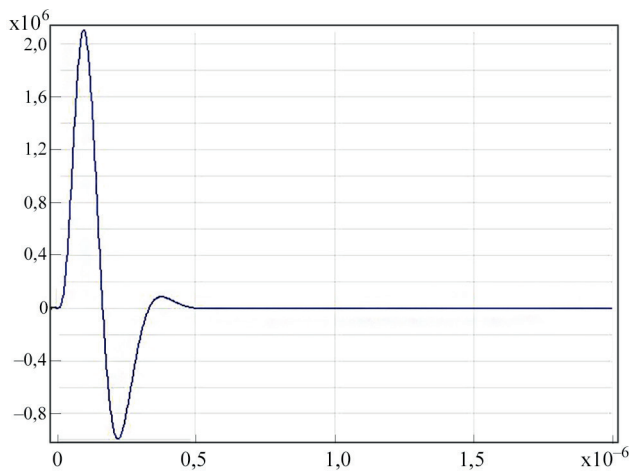


Рис. 8. Збуджуючий вплив задано зміщенням у точці  $S$

ввишки 10 мм. Точкове джерело випромінювання розташовувалося на відстані 10 мм від вершини клину. У точці розташування джерела  $S$  задавалося зміщення (імпульс) вздовж напрямку вектора  $X$ , зміщення задавалося залежністю згідно з графіком на рис. 8. Середовище поширення було встановлено типовими параметрами конструкційної сталі чи води. На границях задавалося умова демпфирования, яка суттєво зменшувала відображення хвиль, що дозволило зменшити геометричні розміри моделі.

Спочатку розглянемо спрощений випадок утворення крайової хвилі на повітряному клині у рідині, де можуть існувати лише хвилі дилатації, що полегшує аналіз хвильової картини. Результат розрахунку наведено на рис. 9.

Наступний розрахунковий приклад для конструкційної сталі – дифракція на клині, заповненому повітрям. На рис. 10 показано момент, коли від падаючої поздовжньої хвилі вже сформовані дві крайові хвилі: поздовжня та наступна за нею поперечна. Амплітуда поздовжньої крайової хвилі має явну залежність від напрямку та в далеких зонах від розриву фронту може відрізнятись від падаючої на два порядки.

Випадок заповнення клину водою (рис. 11) має явні відмінності від повітряного клина. У даному випадку амплітуда крайової хвилі дещо менша, але головна відмінність у тому, що акустична хвиля, що пройшла через клин, обганяє крайову хвилю та має приблизно таку саму амплітуду. Фактично первинна хвиля в деяких зонах маскує дифраговану. Для схерми TOFD методу (рис. 4) фактор, що маскує, буде не таким значним, але принципово буде присутнім і ускладнювати процес контролю.

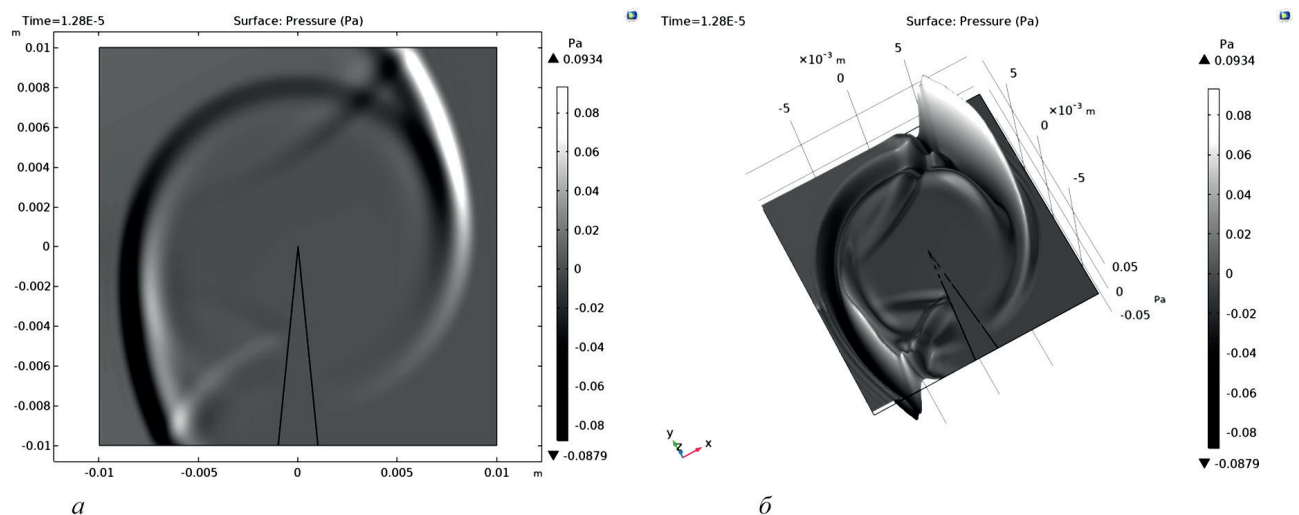


Рис. 9. Дифракція на повітряному клині у воді. Показано розподіл тиску поблизу клина:  $a$  – звичайна двовимірною візуалізація,  $b$  – псевдо тривимірне уявлення, що дозволяє чіткіше оцінити залежність амплітуди дифракційної хвилі від напрямку поширення

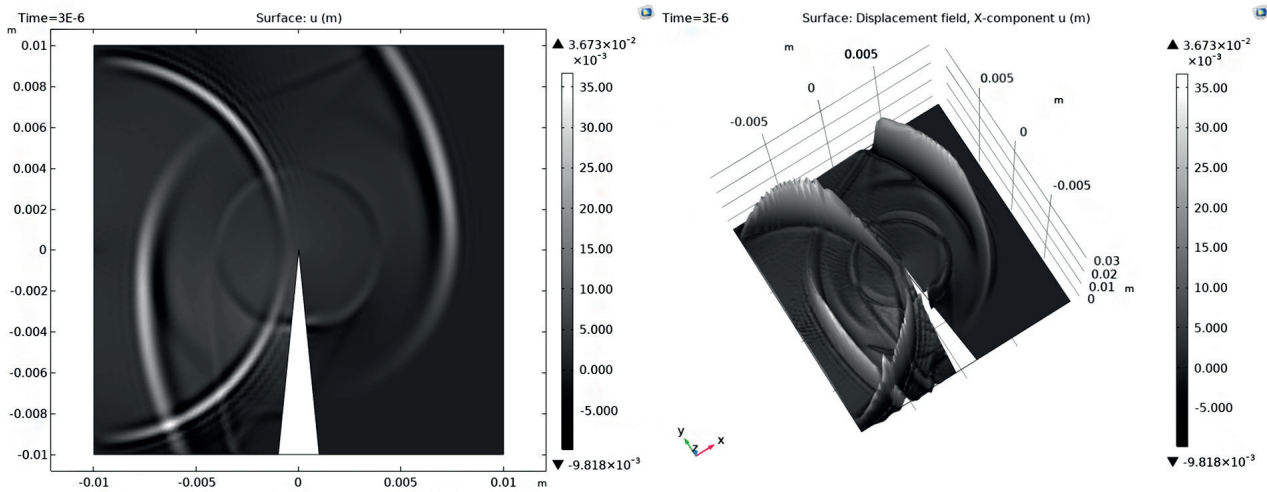


Рис. 10. Дифракція на повітряному клині у сталі. Показано момент падіння поперечної хвилі на клин

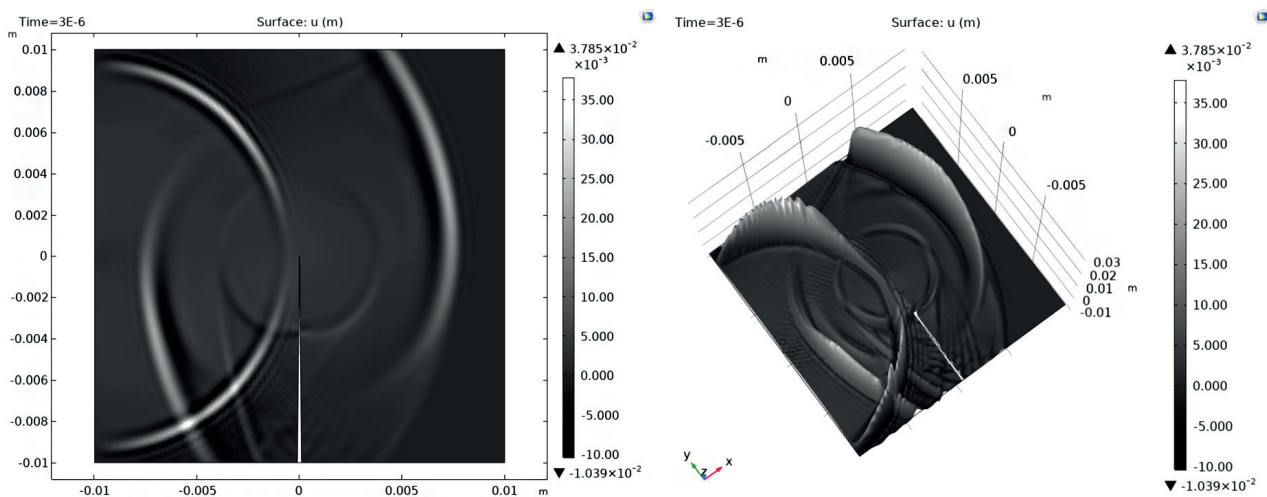


Рис. 11. Дифракція на водяному клині у сталі

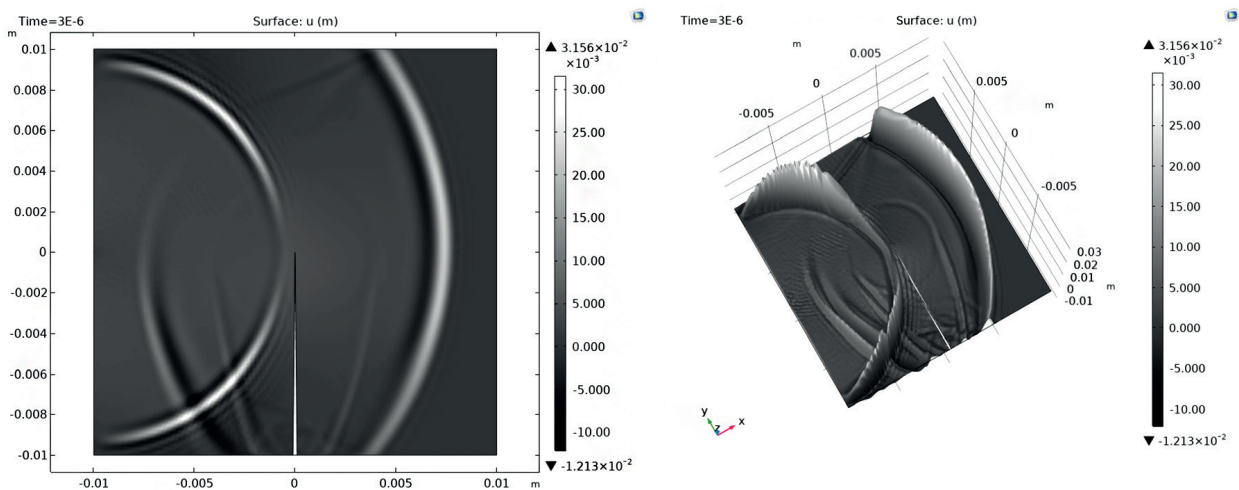


Рис. 12. Дифракція на ртутному клині у сталі

На рис. 12 з метою наочності представлено випадок дифракції хвиль на клині, заповненому ртуттю. Через близькість акустичних імпедансів (відмінність в імпедансах між сталлю і ртуттю приблизно вдвічі, а між сталлю і водою – близько 30) фронт хвилі не зазнає суттєвого розри-

ву на клині і тому кількісно поперечна дифузія невелика, що є наслідком практично повної відсутності поздовжньої хвилі дифракції.

Дифракційна хвиля буде зменшуватися із зменшенням розкриття тріщини, а коли шар має нульову товщину, відсутні причини утворення дифракційної

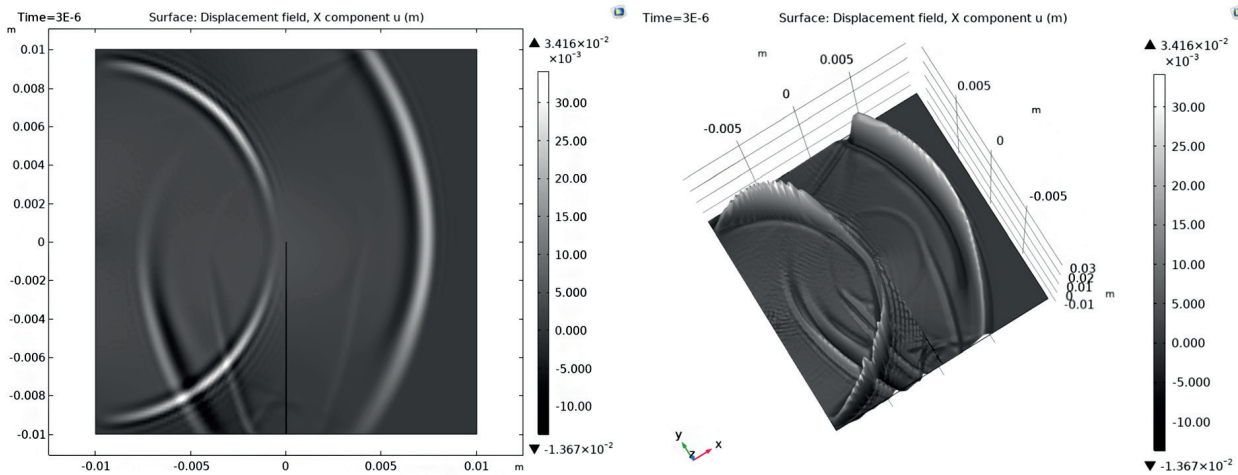


Рис. 13. Дифракція на водному клині у сталі при розкритті 0,01 мм

хвилі. Так, компресійні тріщини можуть мати дуже невеликі параметри розкриття – мікрони або навіть частки мікрон. На рис. 13 показано результат моделювання утворення крайової хвилі на клині з розкриттям 10 мкм, заповненим водою. За такого розкриття фактично дифракційна хвиля відсутня.

**Висновки**

Амплітуда хвиль, що виникають через явища дифракції на краях тріщини, значною мірою залежать від наявності у тріщині рідини (води). Наявність рідини, як мінімум, маскує крайову хвилю, що не дозволяє точно визначити момент її приходу, а при невеликих значеннях розкриття амплітуда хвилі додатково помітно зменшується так, що її достовірне виявлення стає неможливим.

Мабуть, подібний ефект буде відбуватися для незаповнених рідиною тріщин з невеликим розкриттям. Якщо розкриття тріщини менше за довжину хвилі, то хвиля зможе проходити з одного боку тріщини на іншу і тим самим зменшувати амплітуду крайової хвилі та головне – ускладнювати виявлення крайової хвилі.

**Список літератури**

1. Малюжинец Г.Д. (1960) *Дифракция волн. В: Физический энциклопедический словарь* (гл. ред. Б.А. Введенский). Т.1. Москва, Советская энциклопедия.
2. (1981) *Сейсморазведка. Справочник геофизика*. Гурвич И.И., Номоконова В.П. (ред.). Москва, Недра.
3. ISO 10863:2020 *Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of time-of-flight diffraction technique (TOFD)*.
4. ДСТУ EN ISO 15626:2019 *Неруйнівний контроль зварних швів. Дифракційно-часовий метод (TOFD). Рівні приймання (EN ISO 15626:2018, IDT; ISO 15626:2018, IDT)*.
5. *ASME секції VIII розділ II п. 7.5.5.2*.
6. Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. (2007) *Основи акустики*. Київ, Наукова думка.

**References**

1. Malyuzhinets, G.D. (1960) *Wave diffraction. B: Physical encyclopedic vocabulary*. Ed. by B.A. Vvedenskij, Vol. 1. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya [in Russian].
2. (1981) *Seismic prospecting. Refer. book of geophysicist*. Ed. by I.I. Gurvich, V.P. Nomokonova. Moscow, Nedra [in Russian].
3. ISO 10863:2020 *Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of time-of-flight diffraction technique (TOFD)*.
4. DSTU EN ISO 15626:2019 *Non-destructive testing technique. Time-of-flight diffraction (TOFD). Acceptance levels (EN ISO 15626:2018, IDT; ISO 15626:2018, IDT)*.
5. *ASME Sections VIII, Chapter II, p. 7.5.5.2*.
6. Grinchenko, V.T., Vovk, I.V., Matsypura, V.T. (2007) *Fundamentals of acoustics*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].

**FORMATION OF EDGE WAVES FROM SEMI-TRANSLUCENT CRACKS**

V.P. Dyadin, Ye.O. Davydov

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv. E-mail: davudov7764@gmail.com

The paper deals with the features of diffraction wave formation on the edges of cracks, where the inner cavity is filled with liquid. The urgency of such research is dictated by practice of TOFD method application. The surface of industrial facilities quite often is in contact with different liquids. Such facilities include, for instance, practically all the petrochemical and thermal power equipment. Part of the equipment in the working cycle is lubricated with oil, or just operates under the conditions of precipitation, or when surface wetting cannot be avoided. Therefore, the question of the influence of liquid on formation of edge waves from liquid-filled cracks is of a certain interest. 6 Ref., 13 Fig.

*Keywords: edge wave, wave diffraction, TOFD method, crack*

Надійшла до редакції 22.09.2023