

PACS numbers: 07.05.Dz, 07.20.Dt, 07.64.+z, 28.41.Mu, 28.41.Te, 28.52.Nh, 43.58.+z

**Выбор модели реконструкции температурного поля  
для ультразвукового неразрушающего контроля  
замкнутой конструкции с односторонним доступом  
в нестационарных тепловых условиях**

В. А. Михайловский, Н. А. Дордиенко, О. И. Запорожец

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,  
бульв. Акад. Вернадского, 36,  
03680, ГСП, Киев, Украина*

Выполнен количественный анализ теоретических моделей полубесконечной пластины (ПБП) и пластины конечной толщины (ПКТ) для применения при ультразвуковом неразрушающем контроле (УЗНК) температурного поля  $T(x, t)$  в стенке замкнутой конструкции с односторонним доступом в нестационарных тепловых условиях. Теоретические расчёты  $T(x, t)$  сравниваются с соответствующими экспериментальными данными, полученными на массивных образцах из корпусной стали 15Х2МФА реактора ВВЭР-440, которые были подвергнуты импульсному тепловому нагружению (ИТН). Установлено, что модель ПБП эффективна для УЗНК поверхностных внутренних слоёв стенки конструкции (глубина  $x \leq 20\text{--}25$  мм) и малых времён контроля после ИТН ( $t < 10\text{--}20$  с), а модель ПКТ может быть использована для значительно более длительного времени ( $t = 0\text{--}500$  с). Показано, что оптимальным является применение при УЗНК  $T(x, t)$  обеих моделей одновременно.

Виконано кількісну аналіз теоретичних моделей напівнескінченної платівки (НПП) та платівки скінченної товщини (ПСТ) для застосування при ультразвуковому неруйнівному контролі (УЗНК) температурного поля  $T(x, t)$  у стінці замкненої конструкції з однобічним приступом у нестационарних теплових умовах. Теоретичні розрахунки  $T(x, t)$  порівнюються з відповідними експериментальними даними, одержаними на масивних зразках з корпусної сталі 15Х2МФА реактора ВВЕР-440, яких було піддано імпульсному тепловому навантаженню (ІТН). Встановлено, що модель НПП є ефективним для УЗНК поверхневих внутрішніх шарів стінки конструкції (глибина  $x \leq 20\text{--}25$  мм) і малих часів контролю після ІТН ( $t < 10\text{--}20$  с), а модель ПКТ може бути використаний для значно більш тривалого часу ( $t = 0\text{--}500$  с). Показано, що оптимальним є застосування при УЗНК  $T(x, t)$  обох моделей одночасно.

A quantitative analysis of the theoretical models of the semi-infinite plate (SIP) and the finite-thickness plate (FTP) for usage during ultrasonic non-destructive testing (UNDT) of the temperature field,  $T(x, t)$ , in the wall of a closed construction with one-side access under the non-stationary thermal conditions is performed. The theoretical calculations of  $T(x, t)$  are compared with the corresponding experimental data obtained on bulky specimens of hull steel 15Cr2MFA of the WWER-440 reactor, which are subjected to pulsed thermal loading (PTL). As found, the SIP model is effective for UNDT of the inner layers of the wall surface of the construction (with depth  $h \leq 20$ – $25$  mm) and small times of control after the PTL ( $t < 10$ – $20$  s), but the FTP model can be used for significantly more long-term control ( $t = 0$ – $500$  s). As shown, the most optimal for UNDT is using the  $T(x, t)$  of both models simultaneously.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, температурное поле, стенка корпуса ядерного реактора.

*(Получено 8 июня 2015 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Работа направлена на расширение возможностей метода ультразвукового (УЗ) неразрушающего контроля (УЗНК) температурных полей и термических напряжений в стенках замкнутых металлических конструкций с односторонним доступом типа корпусов ядерных реакторов ВВЭР-440 (ВВЭР-1000) в нестационарных тепловых условиях. Метод базируется на измерении в реальном времени ( $t$ ) времени задержки УЗ эхо-импульса  $\tau(t)$ , определении средней по толщине стенки ( $x$ ) температуры  $\langle T \rangle(t) = f(\tau, t)$ , восстановлении по данным УЗ измерений теплового профиля  $T(x, t)$  и вычислении по известным соотношениям для конкретной конструкции соответствующих термических напряжений  $\sigma(x, t)$ . Работа является продолжением исследований, освещённых в [1–5] и в приведённых там ссылках. Так как вопрос УЗ мониторинга зависимости  $\langle T \rangle(t) = f(\tau, t)$  в названных работах экспериментально был решён положительно, наиболее важной задачей для повышения точности определения  $\sigma(x, t)$  является выбор теоретической модели реконструкции  $T(x, t)$ . В работах [2–4] в основе такой модели использовано рассмотрение стенки конструкции как полубесконечной одинарной или двухслойной пластины (ПБП), что эффективно для поверхностных внутренних слоёв и малых времён УЗНК при импульсном тепловом нагружении (ИТН) [4]. Использование модели пластины конечной толщины (ПКТ) [5] предполагает осуществление УЗ контроля  $T(x, t)$  по всей толщине стенки и более длительное время УЗНК.

Целью данной работы было определение оптимальной модели для использования при УЗНК температурных полей и вызванных

ими термических напряжений в корпусах реакторов типа ВВЭР в эксплуатационных условиях (быстрые и медленные процессы). Ниже приведены результаты анализа обеих моделей реконструкции  $T(x, t) = f(\langle T \rangle)$  в двухслойной и однослойной пластинах, которые подвергаются тепловому воздействию со стороны одной из поверхностей. Теоретические расчёты сравниваются с экспериментальными данными работы [4], полученными на массивных образцах из корпусной стали 15Х2МФА реактора ВВЭР-440, подвергнутых импульсному тепловому нагружению.

## 2. МОДЕЛЬ ПОЛУБЕСКОНЕЧНОЙ ДВУХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ (МОДЕЛЬ 1)

На рисунке 1 представлен схематический вид фрагмента двухслойной стенки для первой модели. Для расчёта одномерного температурного поля (температурного профиля) решается уравнение теплопроводности при начальных и граничных условиях (табл. 1). Начальная температура постоянна  $T_{\text{н}} = \text{const}$  при  $t = 0$ . На поверхности  $x = -l_1$  ( $-l_1 \leq x \leq l_2$ ,  $x = 0$  на границе двух слоёв)  $T(-l_1, t) = T_i(t)$  — температура, которая определяется из решения  $T_2(x, t) \rightarrow 0$  при  $x \rightarrow +\infty$ ,  $t > 0$ . Все величины снабжаются индексом слоя — 1 или 2:  $T_1(x, t)$ ,  $T_2(x, t)$  и т.д. Кроме того, должны быть удовлетворены равенства температур и тепловых потоков на границе раздела слоёв:  $T_1(0, t) = T_2(0, t)$  и

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=0} = \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=0} \quad \text{при } t > 0.$$

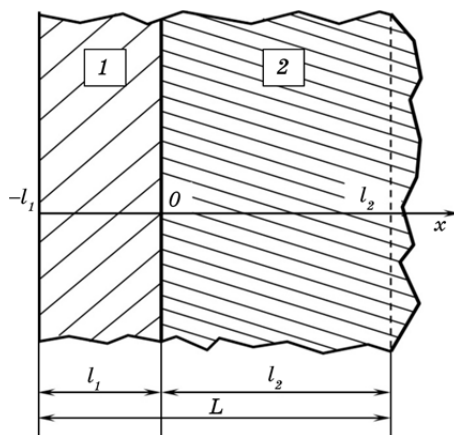


Рис. 1. Схема фрагмента двухслойной стенки для первой модели.

**ТАБЛИЦА 1.** Граничные условия для первой модели.

Слой 1	Слой 2
$-l_1 < x < 0$	$x > 0$
$t > 0$	$t > 0$
$T_1(-l_1, t) = T_l(t)$	$T_2(x, t) \rightarrow 0, x \rightarrow +\infty,$
$T_1(x, 0) = T_H = \text{const}$	$T_2(x, 0) = T_H = \text{const}$
Граница раздела слоёв	
$T_1(0, t) = T_2(0, t), \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big _{x=0} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big _{x=0}$	

Аналитические выражения для температуры внутренней поверхности и тепловые профили в обоих слоях для первой модели, согласно [2, 4], имеют вид:

$$T_l(t) = \frac{L}{\sqrt{a_1 \pi}} \int_0^t \frac{\langle \dot{T}(z) \rangle}{\sqrt{t-z}} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} (-Q)^m \exp \left[ -\frac{l_1^2 m^2}{4a_1(t-z)} \right] \right\} dz, \quad (1)$$

$$T_1(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \beta^n \left\{ \frac{M_n}{\sqrt{\pi}} \int_0^t T_l(z) \frac{\exp \left[ \frac{-M_n^2}{t-z} \right]}{(t-z)^{3/2}} dz - \beta \frac{N_n}{\sqrt{\pi}} \int_0^t T_l(z) \frac{\exp \left[ \frac{-N_n^2}{t-z} \right]}{(t-z)^{3/2}} dz \right\} + T_H \left[ 1 - \frac{2}{1-\sigma} \sum_{n=0}^{\infty} \beta^n \Phi^* \left( \frac{S_n}{\sqrt{t}} \right) \right], \quad (2)$$

$$T_2(x, t) = \frac{(1-\beta)}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} S_n \beta^n \int_0^t T_l(z) \frac{\exp \left[ \frac{-S_n^2}{t-z} \right]}{(t-z)^{3/2}} dz + T_H \left[ 1 - \frac{2}{1-\sigma} \sum_{n=0}^{\infty} \beta^n \Phi^* \left( \frac{S_n}{\sqrt{t}} \right) \right], \quad (3)$$

где

$$\beta = \frac{\sigma-1}{\sigma+1}, \quad \sigma = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} k, \quad k = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}, \quad Q = \frac{(1-k)(1-\beta)}{k}, \quad M_n = \frac{(2n+1)l_1+x}{2\sqrt{a_1}},$$

$$N_n = \frac{(2n+1)l_1-x}{2\sqrt{a_1}}, \quad S_n = \frac{(2n+1)l_1+kx}{2\sqrt{a_1}},$$

$\Phi^*(x) = 1 - \Phi(x), \quad \Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$  — функция ошибок,  $L = l_1 + l_2$  — толщина пластины  $a_i, \lambda_i (i = 1, 2)$  — коэффициенты температуропро-

водности и теплопроводности соответственно.

Для сравнения с экспериментом ниже дана формула для однослойной пластины. Она получена путём предельного перехода при  $a_1 = a_2$ ,  $\lambda_1 = \lambda_2$ ,  $\sigma = 1$ ,  $\alpha = 0$ ,  $l_1 = 0$ ,  $k = 1$ . Тогда при произвольной температуре  $T_i$  на интервале  $0 < x < l_2$ :

$$T(x, t) = T_2(x, t) = \frac{x}{2\sqrt{a_2\pi}} \int_0^t \frac{T_i(z) \exp\left(\frac{x^2}{4a_2(t-z)}\right)}{(t-z)^{3/2}} dz + T_n \Phi\left[\frac{x}{2\sqrt{a_2t}}\right]. \quad (4)$$

### 3. МОДЕЛЬ ДВУХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ (МОДЕЛЬ 2)

На рисунке 2 представлен схематический вид фрагмента двухслойной стенки, а в табл. 2 — граничные условия для второй модели. Краевые условия при этом, по сравнению с первой моделью, отличаются только тем, что вторая модель учитывает температуру на доступной для измерений поверхности:  $T_2(l_2, t) = T_n = \text{const}$ .

Аналитические выражения для температуры внутренней поверхности и тепловые профили в обоих слоях для второй модели, согласно [5], имеют вид:

$$T_i = \frac{L \langle T \rangle}{b_1 l_1 + b_2 l_2} \quad (5)$$

$$T_1(x, t) = T_n + \frac{L \langle T \rangle}{(b_1 l_1 + b_2 l_2)} \frac{(\lambda_1 l_2 - \lambda_2 x)}{(\lambda_1 l_2 + \lambda_2 l_1)} + \quad (6)$$

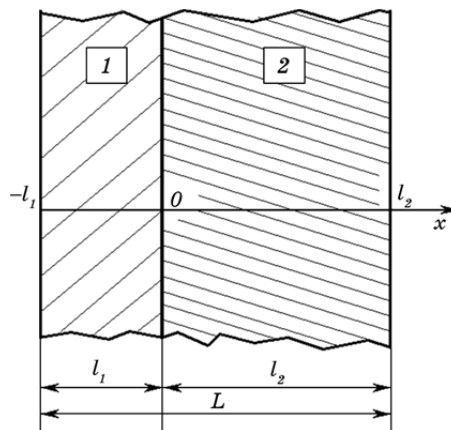


Рис. 2. Схема фрагмента двухслойной стенки для второй модели.

**ТАБЛИЦА 2.** Граничные условия для второй модели.

Слой 1	Слой 2
$-l_1 < x < 0$	$0 < x < l_2$
$t > 0$	$t > 0$
$T_1(-l_1, t) = T_l(t)$	$T_2(l_2, t) = T_H = \text{const}$
$T_1(x, 0) = T_H = \text{const}$	$T_2(x, 0) = T_H = \text{const}$
Граница раздела слоёв	
$T_1(0, t) = T_2(0, t), \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big _{x=0} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big _{x=0}$	

$$\begin{aligned}
 & + \frac{2\sigma Lm}{\pi(r + \sigma s)(b_1 l_1 + b_2 l_2)} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\pi sn) \sin(\pi sn x / l_1) n \int_0^t \langle T(z) \rangle e^{[-mn^2(t-z)]} dz, \\
 T_2(x, t) = & T_H + T_H \Phi^* \left( \frac{l_2 - x}{2\sqrt{a_2 t}} \right) + \frac{L \langle T \rangle}{(b_1 l_1 + b_2 l_2)} \frac{\lambda_1 (l_2 - x)}{(\lambda_1 l_2 + \lambda_2 l_1)} + \\
 & + \frac{2Lm}{\pi(r + \sigma s)(b_1 l_1 + b_2 l_2)} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\pi sn) \sin(\pi r n x / l_2) n \int_0^t \langle T(z) \rangle e^{[-mn^2(t-z)]} dz,
 \end{aligned} \tag{7}$$

где  $m = a_1 \pi^2 s^2 / l_1^2$ ,  $b_1 = (2\lambda_1 l_2 - \lambda_2 l_1) / [2(\lambda_1 l_2 + \lambda_2 l_1)] \cong 0,84$ ,  $kl_2 / l_1 = r/s$  — рациональная дробь,  $b_2 = \lambda_1 l_2 / [2(\lambda_1 l_2 + \lambda_2 l_1)] \cong 0,4254$ .

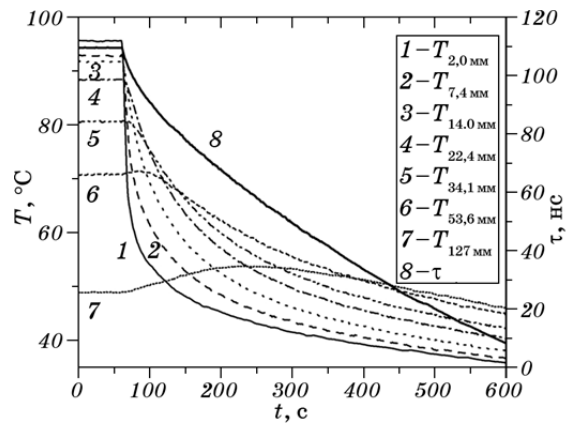
Соответствующие формулы для однослойной пластины получаются путём предельного перехода при  $a_1 = a_2$ ,  $\lambda_1 = \lambda_2$ ,  $\sigma = 1$ ,  $\alpha = 0$ ,  $k = 1$ :

$$\begin{aligned}
 T_1(x, t) = & T_H + \frac{\langle T \rangle (l_2 - x)}{\lambda_2 (b_1 l_1 + b_2 l_2)} + \\
 & + \frac{2Lm}{\pi(r + s)(b_1 l_1 + b_2 l_2)} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\pi sn) \sin(\pi sn x / l_1) n \int_0^t \langle T(z) \rangle e^{[-mn^2(t-z)]} dz,
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 T_2(x, t) = & T_H + T_H \Phi^* \left( \frac{l_2 - x}{2\sqrt{a_2 t}} \right) + \frac{\langle T \rangle (l_2 - x)}{(b_1 l_1 + b_2 l_2)} + \\
 & + \frac{2Lm}{\pi(r + s)(b_1 l_1 + b_2 l_2)} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\pi sn) \sin(\pi r n x / l_2) n \int_0^t \langle T(z) \rangle e^{[-mn^2(t-z)]} dz.
 \end{aligned} \tag{9}$$

#### 4. СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

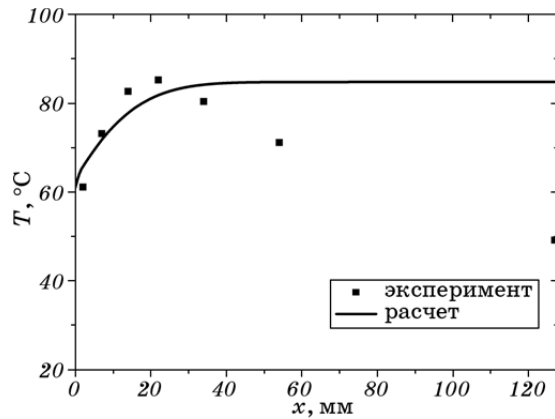
На рисунке 3 представлены зависимости  $T(t)$  на разных участках массивного образца из стали 15Х2МФА (кривые 1–7) и  $\tau(t)$  (кривая



**Рис. 3.** Зависимости  $T(t)$  на разных участках образца из стали 15Х2МФА (1–7) и  $\tau(t)$  (8) во время прерывания его подогрева после ИТН в режиме 20–100°C и резкого охлаждения торца образца в воду при  $T = 20^\circ\text{C}$ .

8) во время прерывания процесса его подогрева после ИТН в режиме 20–100°C и резкого охлаждения торца образца в воду при  $T = 20^\circ\text{C}$ . В рамке на рисунке указано расстояние от термопар до приконтактной с теплоносителем поверхности.

На рисунке 4 приведён тепловой профиль  $T(x)$  через 15 с после резкого охлаждения торца подогретого образца по данным рис. 3 (сплошная кривая). Точки — результат одновременных термометрических измерений. Повторное тепловое нагружение использова-



**Рис. 4.** Тепловой профиль  $T(x)$  в образце из стали 15Х2МФА через 15 с после резкого охлаждения торца подогретого образца по данным рис. 3 (сплошная кривая). Точки — результат одновременных термометрических измерений.

но для формирования в образце встречного теплового потока и искажения теплового профиля.

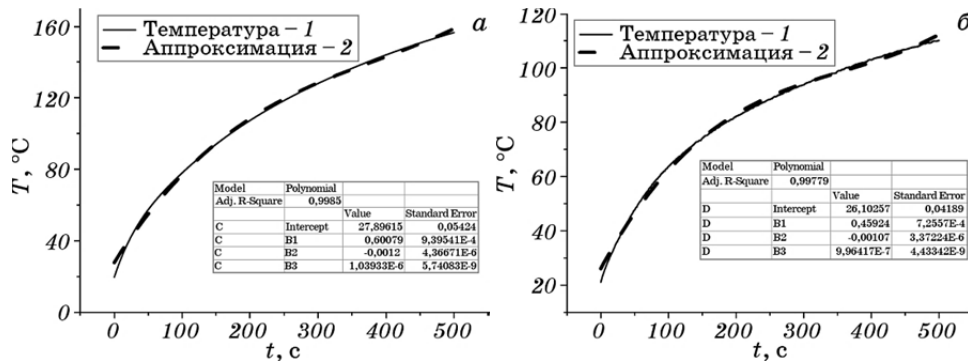
Видно, что на расстоянии  $x < 20\text{--}25$  мм и малых временах ( $t < 10\text{--}20$  с) результаты УЗ и термометрических измерений хорошо согласуются. А для более удалённых от подвергнутого ИТН торца образца и больших значениях  $t$  погрешность УЗНК теплового профиля при использованной теоретической модели ПБП недопустимо увеличивается. Таким образом, модель полубесконечной пластины даёт хорошую согласованность с экспериментом для малых времён и в приконтактной с теплоносителем зоне и не пригодна для  $t > 10\text{--}20$  с и  $x > 20$  мм.

На рисунке 5 представлены результаты сравнения временных зависимостей температуры в сечении образца из стали 15Х2МФА на расстоянии 34,1 мм от зоны ИТН в режиме 20–300°C, рассчитанной по данным УЗ измерений с использованием второй модели ПКТ (кривая 1 на рис. 5, а) и построенной по результатам одновременных термопарных измерений (кривая 1 на рис. 5, б). Видно, что за исключением малых времён ( $t < 10\text{--}15$  с) рассчитанные и экспериментально измеренные зависимости  $T(t)$  вплоть до  $t \cong 500$  с (максимальное время УЗНК в работе [4]) хорошо аппроксимируются полиномами третьей степени (кривые 2 на рис. 5):

$$T(t)_{\text{теор}} = 27,89615 + 0,60079t - 0,0012t^2 + 1,03933 \cdot 10^{-6}t^3, \quad (10)$$

$$T(t)_{\text{exp}} = 26,10257 + 0,45924t - 0,00107t^2 + 0,996417 \cdot 10^{-6}t^3. \quad (11)$$

Основным различием выражений (10) и (11) является разница в постоянных составляющих, что можно учесть при корректировке



**Рис. 5.** Типичные временные зависимости температуры в выделенном сечении образца из стали 15Х2МФА на расстоянии 34,1 мм от зоны ИТН в режиме 20–300°C: а (кривая 1) — расчёт по формулам (8), (9); б (кривая 1) — термопарные измерения [2, 4]; кривая 2 (а, б) — аппроксимация полиномом 3-й степени.



алгоритма программы для восстановления  $T(x, t)$  в стенке конструкции при ИТН. Таким образом, модель пластины конечной толщины показала удовлетворительное согласие с экспериментом для  $t = (10-15)-500$  с, что значительно превышает максимальное время надёжного УЗ контроля  $T(x, t)$  в случае применения модели ПБП.

## 5. ВЫВОДЫ

1. Первая модель ПБП пригодна для реконструкции  $T(x, t)$  и определения  $\sigma(x, t)$  при быстрых процессах ( $t = 10-20$  с), что важно при аварийных остановках ядерного реактора.
2. Вторая модель ПКТ позволяет хорошо отслеживать медленные процессы ( $t = 15-500$  с), которые характерны для работы реактора в стационарном режиме.
3. Оптимальным является применение при УЗНК обеих моделей одновременно. Однако, так как сравнение второй модели с экспериментом в данной работе было ограничено временным интервалом  $t = 0-500$  с, для выяснения вопроса о её пригодности для более длительного УЗ контроля  $T(x, t)$  и определения  $\sigma(x, t)$  в конструкциях типа ядерных реакторов ВВЭР, необходимо выполнение дополнительных экспериментов.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. О. И. Веселовский, М. Е. Гуревич, В. С. Карасев и др., *ВАНТ. Сер. Физика*, вып. 1(58)-2(59): 129 (1992).
2. О. И. Запорожец, А. В. Личко, В. В. Немошкаленко, А. И. Носарь, *Металлофиз. новейшие технол.*, 17: 961 (1999).
3. О. И. Запорожец, В. В. Немошкаленко, А. И. Носарь, *Метод неразрушающего контроля конструкций*, Патент Украины № 21827 А. G01L13/100 (Опубл. 30 апреля 1998 г.) (Бюлл. № 2).
4. Н. А. Дордиенко, О. И. Запорожец, В. А. Михайловский, В. Б. Молодкин, *Металлофиз. новейшие технол.*, 34, № 7: 949 (2012).
5. Н. Дордиенко, О. Запорожец, В. Михайловский, А. Носарь, *Вісник ТНТУ*, 72, № 4: 151 (2013).

## REFERENCES

1. O. I. Veselovskiy, M. E. Gurevich, V. S. Karasev et al., *VANT. Ser. Fizika*, Iss. 1(58)-2(59): 129 (1992) (in Russian).
2. O. I. Zaporozhets, A. V. Lichko, V. V. Nemoshkalenko, and A. I. Nosar, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 17: 961 (1999).
3. O. I. Zaporozhets, V. V. Nemoshkalenko, and A. I. Nosar, *Method of Non-Destructive Control of Constructions*, Patent of Ukraine No. 21827 A.

G01L13/100 (Publ. April 30, 1998) (Bull. No. 2).

4. М. О. Дордиенко, О. И. Запорожцы, В. А. Михайловский, and В. В. Молодкин, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **34**, No. 7: 949 (2012) (in Russian).
5. N. Dordienko, O. Zaporozhets, V. Mykhailovskyy, and A. Nosar, *Visnyk TNTU (Scientific Journal of the Ternopil National Technical University)*, **72**, No. 4: 151 (2013) (in Russian).