

UDC 539.375

ASSESSMENT OF THE TEMPERATURE LOADING INFLUENCE ON CRACK RESISTANCE OF A TANK WITH A SEMI-ELLIPTIC CRACK

S.O. Pyskunov¹,

Dr. Sci.

M.V. Goncharenko²,

Ph.D.

O.O. Shkryl²,

Dr. Sci.

¹*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Peremogy ave., 37, Kyiv, 03056*

²*Kyiv National University of Construction and Architecture,
Povitroflotsky Ave., 31, Kyiv, 03680*

DOI: 10.32347/2410-2547.2022.108.87-96

The estimation of a stress-strain state of a steel vertical tank with an initial semi-elliptical crack under the thermal loading is performed. The distribution of stress intensity factor along the crack front is obtained. A comparison of the results obtained under hydrostatic pressure is made.

Keywords: finite element method (FEM), elliptic crack, stress intensity factor, tank, thermal loading.

Introduction. Reservoir parks are the main place of storage of petroleum products at refineries and transport companies nowadays. However, it leads to fire risk increase to accumulate large quantities of petroleum products in a relatively small area of such enterprises. Tank fire is one of the most dangerous emergency event, which can lead not only to significant material damage but also to ecological human losses. There has been a tendency transition to the use of larger tanks in recent years, which is economically justified. In turn, the risk of spreading of fire to other tanks increases during the fire event of such tank. According to statistics, data there have been 12 fires a year in the post-Soviet space over the past 30 years. During a fire, the temperature of the tank walls can reach 800 degrees. The heat released during combustion is distributed to neighboring tanks that leads to heat of their walls up to 300 degrees [7]. To ensure safety and test the bearing capacity in these conditions determination of the stress-strain state in such tanks must be performed taking into account the temperature load. Temperature loading is especially dangerous if there is an initial crack in the tank wall. In such cases, the assessment of crack resistance should be performed based on fracture mechanics approaches. The stress intensity factor (SIF) is used as a parameter to crack resistance assessment most often.

The problem of SIF calculating under thermal load is considered in a number of scientific papers of different years. The most attention is paid to the

development of analytical methods [1, 5, 6, 10, 12, 19], in particular taking into account the structure of the material [1, 19] or specific crack shape [5, 6]. In article [12] the use and calculation of two-dimensional thermal J^* -integral for linear thermoelastic materials using the finite element method (FEM) is discussed. The publications cited here by no means exhaust the known experience in solving the problem under consideration.

The authors of this article developed the experience of calculating the parameters of fracture mechanics for a long time also [2-4, 8, 11, 13, 14, 15, 17], including thermal stress [15, 16, 18]. It was shown, in particular, that in order to achieve the required accuracy of the solution under temperature loading, it is necessary to use smaller size of finite elements at the crack tip then one needs under force loading [15].

In a previous work [13] the authors determined the SIF distribution along the semi-elliptical crack front in the RVS-5000 tank under hydrostatic pressure. It is important to continue the study of crack resistance of this tank, taking into account the temperature load.

Determination of SIF values under thermal load can be done by direct and energy methods. The relationship between displacements and values of mode I SIF (opening or tensile mode) K_I near the crack tip at a constant temperature

T when the direct method is used, is described by the following formula [9]:

$$u_i = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot F_i(\theta) + \alpha' \cdot k \cdot T \cdot y_i^n, \quad (1)$$

where G – the shear modulus; ν - Poisson's ratio; $\alpha' = \alpha$ - coefficient of linear expansion in the case of a plane stress state, $\alpha' = \alpha(1 + \nu)$ for a plane deformation

$$F_1(\theta) = \sin \frac{\theta}{2} \left(k + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right),$$

$$F_2(\theta) = \cos \frac{\theta}{2} \left(k - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right),$$

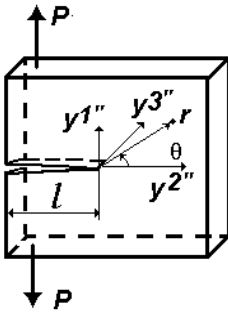


Fig. 1. Normal break crack

where $k = (3 - \nu) / (1 + \nu)$ for a plane stress state, $k = 3 - 4\nu$ for a plane deformation.

The formula (1) acquires a more specific form if values of displacements which is perpendicular to the crack plane being used:

$$K_I = \frac{u_1 - \alpha \cdot (1 + \nu) \cdot T \cdot x^1}{\sin \frac{\theta}{2} (2 - 4\nu + \cos \theta)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \cdot 2G. \quad (2)$$

Implementation of the SIF calculation technique using the direct method in discrete models of FEM is described in [8, 11, 13-16].

The energy method involves the SIF calculation using the J^* value, which in case of thermal load has the next form:

$$J^* = J + \int_V \alpha \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \frac{\partial T}{\partial x} dV. \tag{3}$$

The first component is the Cherepanov-Rice's J-integral, determined by integration along the contour S of the domain V :

$$J = \int_S \left(W n_t - \sigma^{ij} \frac{\partial u}{\partial x} n_j \right) dS. \tag{4}$$

The second component is determined by integrating of the internal volume of the domain V .

The generalized reaction method in discrete FEM models [8, 11, 17] is used for calculation of J^* in this paper. The implementation of this method involves the consideration of two states of the volume, which is situated near of tip of with a fixed length l_{cr} (Fig. 2). During the transition from the first state to the second the location of the domain V changes on one finite element in relation to the crack tip (Fig. 2).

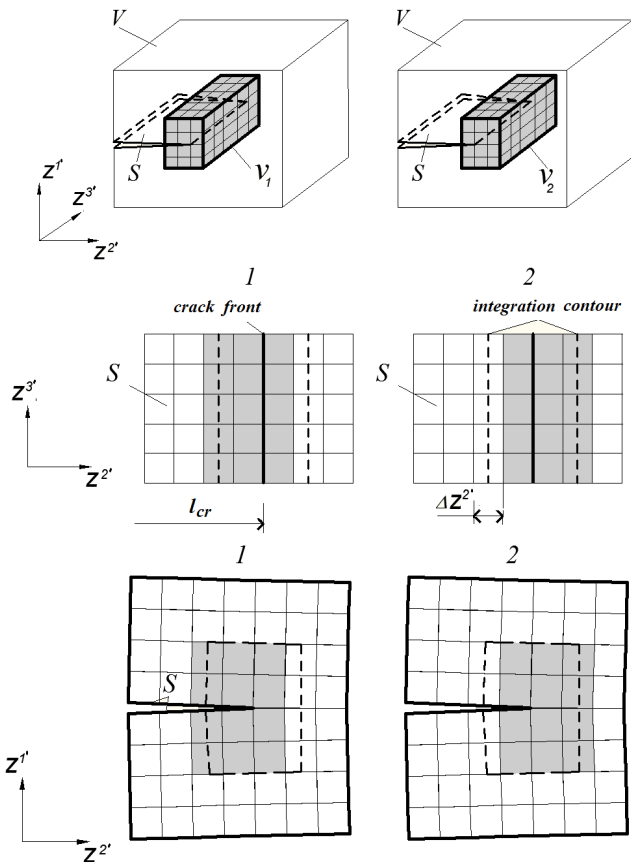


Fig. 2. Scheme of subdomains transition in J^* calculation procedure

The vectors of displacements and nodal reactions of the subdomain in states 1 and 2 are denoted as $\{u\}_I, \{R\}_I$ та $\{u\}_{II}, \{R\}_{II}$. Each of these vectors contains $3N$ components, which are the values of displacements and nodal reactions in three directions, respectively:

$$\{u\}_I^T = \{(u_1')_1 (u_2')_1 (u_3')_1 \dots (u_k')_n \dots (u_3')_{N-1} (u_1')_N (u_2')_N (u_3')_N\},$$

where the indices $k' = 1, 2, 3$ represent the directions of movement, and the indices $n = 1, 2, \dots, N$ are the numbers of nodes within each of the subdomains.

Under the condition of a regular finite element mesh in the $z^{2'}$ direction, the definition formula in discrete models takes the following form [2, 8, 11]:

$$J^* = \frac{1}{2\Delta z^{2'}} \left(\{u\}_{II}^T \{R\}_{II} - \{u\}_I^T \{R\}_I \right) - \frac{1}{2\Delta z^{2'}} \left(\{u\}_{II}^T - \{u\}_I^T \right) \left(\{R\}_I + \{R\}_{II} \right). \quad (5)$$

After multiplying the reactions to the corresponding movements and adding of similar components we obtain:

$$J^* = \frac{1}{2\Delta z^{2'}} \left(\{u\}_I^T \{R\}_{II} - \{u\}_{II}^T \{R\}_I \right). \quad (6)$$

The reliability of this calculation procedure is shown in [3, 11].

Numerical modeling of a tank with a crack. The geometric scheme of the HRV-5000 tank and the initial data are shown in Fig. 3(a). Mechanical characteristics $E = 2.1 \cdot 10^5$ MPa, $\nu = 0.3$, $\alpha = 1.2 \cdot 10^{-5}$: The surface of the oil product is at a height of 11,4 m. Hydrostatic pressure varies from 0 at the mark of 11,4 m to $91,7 \text{ kN/m}^2$ on the bottom. The part of wall of the tank, located closest to the fire epicenter, is heated unevenly in height: from 300 degrees at the top to 200 degrees at the bottom. On the other part of the tank the temperature reaches 70 degrees. The temperature within wall thickness is considered constant since one is quite small (8,7 mm). Given the asymmetric nature of the temperature distribution, a discrete model was developed for the entire tank (Fig. 3(b)).

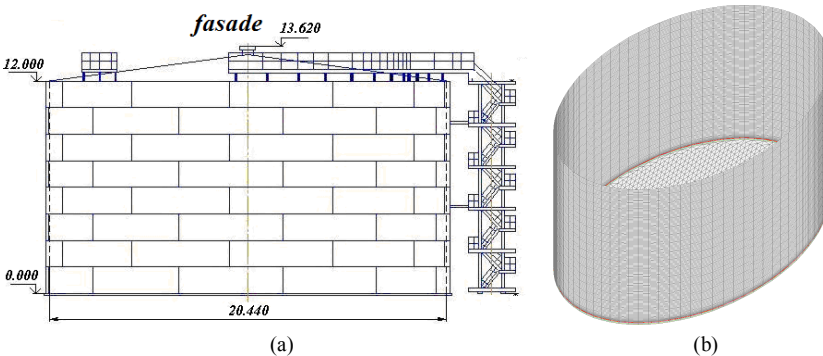


Fig. 3. The general view (a) and the discrete FEM model (b) of vertical tank HRV-5000

The calculation was performed in two stages, which involved determining of the stress-strain state for the tank as a whole (Fig. 3) and determining the SIF using the calculation model as a fragment of the tank wall with a semi-elliptical crack (Fig. 5(a)). The obtained distribution of circumferential stresses $\sigma_{3'3'}$, which are directed perpendicular to the plane of the crack and determine the fracture process, under the action of hydrostatic pressure (axisymmetric) and temperature load (not axisymmetric, due to heating of the part of the tank closest to the fire) for the whole structure is shown in Fig. 4. These results allowed to perform fragmentation of the calculation scheme, in particular - the magnitude of the loads that must be applied to the cut fragment with a crack.

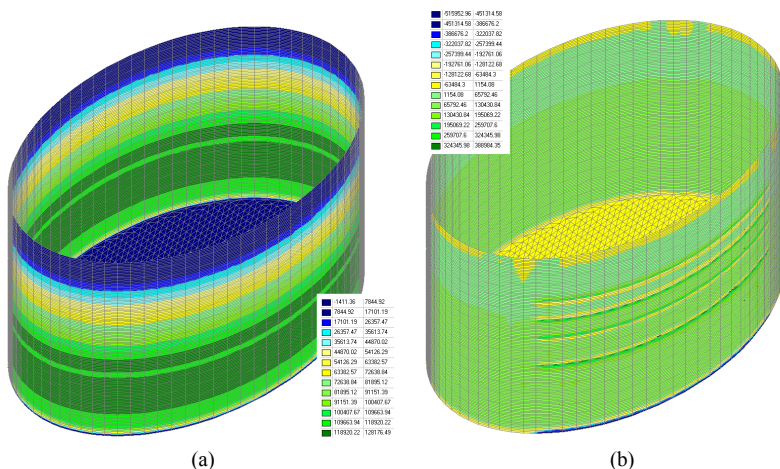


Fig. 4. Distribution of circumferential stresses under hydrostatic pressure (a) and thermal load (b)

The values of these loads were determined using the stress distributions obtained in the calculation of the tank as a whole and acting in the corresponding sections, which are limit the fragment of wall with crack. Semi analytical finite element method (SFEM) used for to form a discrete model of a wall fragment with a crack [4, 11]. The crack modeling in the fragment was made due to the implementation of the relevant boundary conditions: the surface of the crack located in the plane $z^1 - z^2$ (marked in white in Fig. 5(a)). It is considered free from attachments along z^3 . All other points of the end surface (marked in gray in Fig. 5(a)) are fixed along z^3 .

Fig. 6 shows the the obtained distribution of SIF along the crack front under hydrostatic pressure [13] and under thermal load. Calculation was carried out by a direct and energetic method, the difference of results are in the range of 5%.

The obtained results show the uneven distribution of SIF along the crack front both for the case of hydrostatic pressure loading and for temperature loading. The minimum value of SIF acquires at the point of the front, which is located on the outer surface of the tank. The maximum value of SIF acquires at

the point of the front that is furthest from the outer surface. The difference of SIF along the crack front is about 50%.

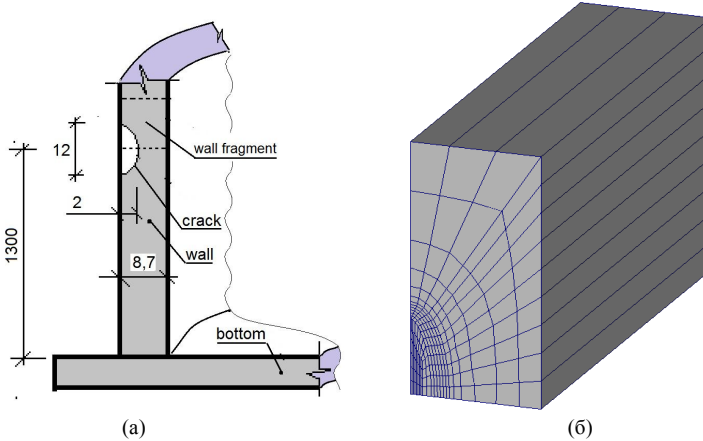


Fig. 5. The location of the crack in the wall of the tank (a) and SFEM discrete model of the wall fragment with a crack (b)

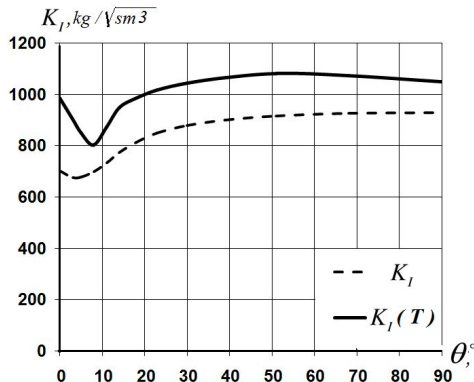


Fig. 6. SIF distribution along the crack front

Taking into account the temperature loading leads to an increase in the SIF values by about 20%. Thus, taking into account the temperature components of the load is important for the correct determination of fracture resistance of a tank for petroleum products storage.

REFERENCES

1. Anuwedita Singha, Dasa S., Craciun E. Thermal stress intensity factor for an edge crack in orthotropic composite media // Composites Part B: Engineering Volume 153, 15 November 2018, Pages 130-136.
2. Bazhenov V., Pyskunov S., Shkryl O. A methodology of determining of parameter J^* in discrete models of finite element method // Strength of materials and theory of structures. – 2017. – No.99. – C. 33-44.

3. *Bazhenov V.A., Gulyar A.I., Piskunov S.O., Shkryl' A.A.* Validity of a Modified Method of Evaluating the Invariant J-integral for Elastoplastic Deformation of Prismatic Solids / International Applied Mechanics. – 2018, v.54 – No.4. – PP. 378–383.
4. *Bazhenov, V.A., Pyskunov S.O., Solodoy I.I.* Continuum mechanics: semi-analytical finite element method. - Cambridge Publisher, 2019. - 216 p.
5. *Chen F.M., Chao .C.K, Chiu C.C., Noda N.A.* Stress intensity factors for cusp-type crack problem under mechanical and thermal loading // Journal of Mechanics. - Vol. 37, 2021. – PP.279–332. <https://doi.org/10.1093/jom/ufaa028>
6. *Chhabral V., Kumar N.* Analysis of Stress Intensity Factor in a Surface Cracked Plate under Convective Thermal Loading // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering IOP Publishing. - doi:10.1088/1757-899X/1116/1/012011.
7. *Lokalyzatsiya pozharov v rezervuarakh s nefteproduktamy* [Localization of fires in tanks with oil products] / A.E. Basmanov, A.A. Mykhailiuk. – Kharkov: NUHZU, 2011. – 108 p.
8. *Mekhanika ruinuвання. Spetskurs: navchalnyi. posibnyk* [Fracture Mechanics. Special course: educational manual (in Ukrainian)] / O.O.Shkryl. - Kyiv: KNUBA, 2020. – 104 p.
9. *Morozov E. M.* Metod konechnych elementov v mekhanike razrusheniya [Finite element method in a fracture mechanic] / [E. M. Morozov, H. P. Nykyshkov]. – M. : Nauka, 2017. – 257 p.
10. *Nabavi S. M., R. Ghajar R.* Analysis of thermal stress intensity factors for cracked cylinders using weight function method // International Journal of Engineering Science. - 48(12), 2010. - PP:1811–1823. DOI:10.1016/j.ijengsci.2010.08.006
11. *Napivanalitichnyi metod skinchenykh elementiv u zadachakh ruinuвання til z trishchynamy* [Semi-analytical method of finite elements in problems of fracture of bodies with cracks (in Ukrainian)] / Bazhenov V. A., Pyskunov S. O., Shkryl O. O. – Kyiv: Karavela, 2017. – 208 p.
12. *Ognjanović O., Stamenković D., Maksimović K.* Effects of Thermal Gradients on Fracture Mechanics Parameters // Scientific Technical Review. - Vol.63, No.32013, PP.17-21.
13. *Pyskunov S. O., Shkryl O.O. Maksymiuk Yu.V.* Vyznachennia trishchynostiikosti rezervuaru z napiveliptychnoiu trishchynoiu [Determination of a cracks resistance of a tank with a semi elliptical crack] // Strength of materials and theory of structures. – 2021. –No. 106. – PP. 60-66.
14. *Pyskunov S.O., Shkryl O.O., Mytsiuk S.V.* Priamyi metod vyznachennia koefitsiientiv intensyvnosti napruzhen v pryzmatychnykh ta prostоровykh nezamknytykh tilakh obertannia pry statychnomu navantazhenni [Direct method for determining stress intensity coefficients in prismatic and spatial open bodies of rotation under static load (in Ukrainian)] // Strength of materials and theory of structures. – 2016. – No. 97. – PP. 3-14.
15. *Pyskunov S.O., Hrechukh N.A., Ostapenko R.M.* Obchyslennia KIN v prostоровykh tilakh obertannia pry temperaturnomu navantazhenni [SIF calculation in space circular bodies under thermal loading] // Strength of materials and theory of structures. – 2006. – No. 80. – PP.38-53.
16. *Pyskunov S.O., Shkryl O.O.* Vyznachennia trishchynostiikosti zakhysnoi obolonky yadernoho reaktoru pry termosylovomu navantazhenni [Determination of crack resistance of the protective shell of a nuclear reactor under thermal load (in Ukrainian)] // Strength of materials and theory of structures. – 2018. – No.101. – PP. 60-66.
17. *Shkryl O.O.* Vyznachennia G na osnovi obchyslennia invariantnykh ob'ємnykh intehraliv metodom reaktsii [Determination of G based on the calculation of invariant volume integrals by the reaction method (in Ukrainian)] // Strength of materials and theory of structures. – 2017. – No.98. – PP.31-42.
18. *Shkryl O.O.* Vyznachennia koefitsiientiv intensyvnosti napruzhen u dvovymirnykh tilakh pry temperaturnomu navantazhenni [Determination of stress intensity factor in two-dimensional bodies under thermal loading] // Strength of materials and theory of structures. . – 2014. – No. 93 – PP.125-133.
19. *Walters Matthew C., Paulino Glaucio H., Dodds Robert H.* Stress-intensity factors for surface cracks in functionally graded materials under mode-I thermomechanical loading // International Journal of Solids and Structures. - 41, 2004. – PP.1081–1118.

Пискунов С.О., Гончаренко М.В., Шкріль О.О.

ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ РЕЗЕРВУАРУ З НАПІВЕЛІПТИЧНОЮ ТРИЩИНОЮ

Резервуарні парки на сьогоднішній день є основним місцем зберігання нафтопродуктів на нафтопереробних заводах та підприємствах транспорту. Велике скупчення нафтопродукту на відносно невеликій площі резервуарного парку призводить до підвищеної пожежної небезпеки на таких підприємствах. Пожежа в резервуарі є однією з найнебезпечніших надзвичайних ситуацій, що може призвести не лише до значних матеріальних збитків але і до людських втрат. В останні роки спостерігається тенденція переходу до резервуарів більшої ємності, що економічно обгрунтовано. В свою чергу, у випадку виникнення пожежі в таких резервуарах підвищується небезпека її перекидання на інші резервуари. Визначення напружено-деформованого стану (НДС) в таких резервуарах потрібно виконувати із врахуванням температурного навантаження. В деяких резервуарах при цьому можуть бути дефекти у вигляді тріщин. В таких випадках оцінка НДС в них виконується на основі підходів механіки руйнування. В попередніх дослідженнях авторами було визначено розподіл коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) вздовж фронту напівеліптичної тріщини в резервуарі РВС-5000 від дії гідростатичного тиску. В даній статті продовжено дослідження тріщиностійкості даного резервуару із врахуванням температурного навантаження, що виникає внаслідок пожежі сусіднього резервуара. Визначення КІН відбувалося прямим та енергетичним методами. Температура стінки чверті резервуара, що розташована найближче до епіцентру пожежі, змінюється по висоті від 300 градусів у верхній частині до 200 градусів у нижній частині. На іншій частині резервуара температура сягає 70 градусів. Оскільки товщина стінки є досить малою, то температура в її межах вважається постійною. Враховуючи несиметричний характер розподілу температур, дискретна модель розроблена для всього резервуара. Після визначення НДС в цілому резервуарі, окремо був проведений розрахунок фрагмента з напівеліптичною тріщиною. В якості зовнішнього навантаження прикладено напруження, що визначені із загального розрахунку резервуара на гідростатичний тиск та температурне навантаження. Отримані результати прямого та енергетичного методів відрізняються в межах 5%. Врахування температурного навантаження призводить до збільшення значень КІН приблизно на 20 відсотків порівняно із результатами розрахунку лише на гідростатичний тиск.

Ключові слова: метод скінченних елементів (МСЕ), еліптична тріщина, коефіцієнт інтенсивності напружень, резервуар, термосилове навантаження.

Pyskunov S.O., Goncharenko M.V., Shkryl O.O.

ASSESSMENT OF THE TEMPERATURE LOADING INFLUENCE ON CRACK RESISTANCE OF A TANK WITH A SEMI-ELLIPTICAL CRACK

Reservoir parks are the main place of storage of petroleum products. There has been a tendency transition to the use of larger tanks in recent years, which is economically justified. However, it is leads to fire risk increase to accumulate large quantities of petroleum products. Tank fire is one of the most dangerous emergency event, which can lead not only to significant material damage but also to ecological human losses in case of spreading of fire to other tanks. To ensure safety and test the bearing capacity in these conditions determination of the stress-strain state in such tanks must be performed taking into account the temperature load. If there is an initial crack in the tank wall the assessment of crack resistance should be performed. In a previous work the authors determined the stress intensity factor (SIF) distribution along the semi-elliptical crack front in the RVS-5000 tank under hydrostatic pressure. The estimation of a stress-strain state of a steel vertical tank with an initial semi-elliptical crack under the thermal loading is performed in this article. It is supposed that the part of wall of the tank, located closest to the fire epicenter, is heated unevenly in height: from 300 degrees at the top to 200 degrees at the bottom. On the other part of the tank the temperature reaches 70 degrees. The temperature within wall thickness is considered constant. Given the asymmetric nature of the temperature distribution, a discrete model was developed for the entire tank. After determining the stress-strained state in the whole tank under hydrostatic pressure and temperature load, a fragment with a semi-elliptical crack was calculated separately. The stresses determined from the calculation of the whole tank are used like an external load, applied on fragment boundaries. The difference of results of direct and energetic method of SIF calculation are in the range of 5%. Taking into account the temperature loading leads to an increase in the SIF values by about 20 % in comparison to the results of the calculation only under hydrostatic pressure.

Keywords: finite element method (FEM), elliptic crack, stress intensity factor, tank, thermal loading.

Пискунов С.О., Гончаренко М.В., Шкріль А.А.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ РЕЗЕРВУАРА С ПОЛУЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОЙ

Проведена оцінка напружено-деформованого стану резервуара з початковою напівеліптичною тріщиною при дії термосилового навантаження викликаного дією гідростатического тиску та теплового впливу від пожежі в сусідньому резервуарі. Отримано розподіл коефіцієнтів інтенсивності напружень вздовж фронту тріщини.

Ключевые слова: метод конечных элементов (МКЭ), эллиптическая трещина, коэффициент интенсивности напряжений, резервуар, термосиловое нагружение.

УДК 539.375

Пискунов С.О., Гончаренко М.В., Шкріль О.О. Оцінка впливу температурного навантаження на тріщиностійкість резервуара з напівеліптичною тріщиною // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2022. – Вип. 108. – С. 87-96.

Проведена оцінка напружено-деформованого стану резервуара з початковою напівеліптичною тріщиною при дії термосилового навантаження, внаслідок дії гідростатического тиску та теплових ефектів від пожежі в сусідньому резервуарі. Отриманий розподіл коефіцієнтів інтенсивності напружень вздовж фронту тріщини.

Іл. 6. Бібліогр. 19 назв.

UDC 539.375

Pyskunov S.O., Goncharenko M.V., Shkryl O.O. Assessment of the temperature loading influence on crack resistance of a tank with a semi-elliptical crack// Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-&-Technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2022. – Issue 108. – P. 87-96.

The estimation of a stress-strain state of a steel vertical tank with an initial semi-elliptical crack under the thermal loading is performed. The distribution of stress intensity factor along the crack front is obtained. A comparison of the results obtained under hydrostatic pressure is made.

Fig. 6. Ref. 19.

УДК 539.375

Пискунов С.О., Гончаренко М.В., Шкріль А.А. Оценка влияния температурного нагружения на трещиностойкость резервуара с полуэллиптической трещиной // Сопротивление материалов и теория сооружений: науч.-тех. сборн. – К.: КНУСА, 2022. – Вып. 108. – С. 87-96.

Проведена оцінка напружено-деформованого стану резервуара з початковою напівеліптичною тріщиною при дії термосилового навантаження викликаного дією гідростатического тиску та теплового впливу від пожежі в сусідньому резервуарі. Отримано розподіл коефіцієнтів інтенсивності напружень вздовж фронту тріщини.

Іл. 6. Бібліогр. 10 назв.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): професор, доктор технічних наук, завідувач кафедру динаміки і міцності машин та опору матеріалів НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Пискунов Сергій Олегович.

Адреса: 03056 Україна, м. Київ, просп. Перемоги 37, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, кафедра динаміки і міцності машин та опору матеріалів.

Мобільний тел.: +38(050) 962-66-14

E-mail: s.piskunov@kpi.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3987-0583>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки КНУБА Гончаренко Марина Вікторівна

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки.

Мобільний тел.: +38(096) 259-79-08

E-mail: maringo@ua.fm

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7396-5335>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): професор, доктор технічних наук, професор кафедри будівельної механіки КНУБА Шкриль Олексій Олександрович.

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки.

Мобільний тел.: +38(050) 307-61-49

E-mail: alexniism@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0851-4754>