

DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.03

УДК 621.64:539.42

С.В. Глушков, Ю.В. Скворцов, С.Н. Перов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский
университет), Самара, Россия

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ ТРУБЫ С НЕСКВОЗНОЙ ТРЕЩИНОЙ

Причиной опасного состояния трубопроводов часто выступают острые дефекты в стенке труб. Наибольший интерес представляют несквозные поверхностные трещины. В общем случае такие трещины имеют сложную форму фронта, то есть являются многопараметрическими. Современные методы неразрушающего контроля не позволяют с достаточной степенью точности получить полную информацию о форме фронта. В мировой практике для упрощения расчетных методик принято дефекты аппроксимировать трещиной полуэллиптической формы. В этом случае дефект является двухпараметрическим и характеризуется лишь максимальной глубиной и протяженностью.

В работе рассматривается стальная труба, ослабленная несквозной поверхностной трещиной полуэллиптической формы. Трещина имеет продольную ориентацию и располагается на наружной поверхности трубы. Труба испытывает действие внутреннего давления. При помощи САЕ-системы ANSYS решается задача механики разрушения. Для точек вдоль фронта дефекта исследуется распределение значений коэффициента интенсивности напряжений, вычисленных при помощи инвариантного J-интеграла. Расчет значений J-интеграла выполняется методом интегрирования по области. Проводится сравнение полученных в работе результатов с данными других авторов, полученных для труб и цилиндрических сосудов давления, ослабленных несквозными трещинами. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с известными решениями. Применение регулярной сетки с большим числом конечных элементов вдоль фронта дефекта существенно повышает точность решения задачи механики разрушения. Исследование распределения параметров механики разрушения позволило выявить наличие краевого эффекта вблизи выхода фронта трещины на поверхность трубы. Он заключается в наличии локальных максимумов, значения в которых существенно выше, чем в конечных точках фронта. При исследовании роста трещины в условиях нестационарного нагружения, то есть при наличии пульсаций давления, следует использовать именно эти значения.

Ключевые слова: труба, несквозная поверхностная трещина, механика разрушения, коэффициент интенсивности напряжений, метод конечных элементов, ANSYS.

S.V. Glushkov, Yu.V. Skvortsov, S.N. Perov

Samara State Aerospace University (SSAU), Samara, Russian Federation

COMPARISON OF THE RESULTS OF SOLVING THE PROBLEM OF FRACTURE MECHANICS FOR PIPE WITH NON-THROUGH CRACK

Dangerous conditions to the pipelines can often be caused by different defects which occur in the pipe walls. Non-through surface cracks attract particular interest. Generally these cracks have compound front form – in other words, they are polyvalent. Modern methods of nondestructive inspection do not give complete information on the crack front shape with adequate accuracy. In global practice defects are approximated with the semielliptical cracks to simplify calculation methods. In this case the defect is considered two-parameter and it is only defined by maximum depth and length.

This paper examines a steel pipe, which has been weakened by the semi-elliptical non-through surface crack. The crack is common to the external pipe area and has longitudinal orientation. The pipe is exposed to internal pressure. Fracture mechanics problem is resolved with ANSYS CAE-system. Stress intensity factor values distribution for the crack front points is under analysis. These values were obtained by using invariant J-integral. J-integral values calculation was performed using integration over a region technique. The obtained results are compared with the data published by other authors. These data resulted from the analysis of pipes and cylindrical pressure vessels weakened by non-through cracks. The results of numerical modelling correlate accurately with the existing solutions. Accuracy of the fracture mechanics problem solution can be significantly increased by using regular mesh with multiple finite elements along to the crack front. Fracture mechanics parameters investigation identified presence of edge effect common to the area where the crack front goes to the pipe surface. Edge effect refers to the local maximum values which are much higher than the crack front end points values. These values should be used while investigating crack propagation under variable loading – that is when pulsations take place in load condition.

Keywords: pipe, non-through surface crack, fracture mechanics, stress intensity factor, finite element method, ANSYS.

Причиной опасного состояния, а в отдельных случаях и разрушения трубопроводных систем, предназначенных для транспортировки углеводородов, как правило, является наличие острых трещиноподобных дефектов технологического или эксплуатационного происхождения [1, 2]. Наибольший интерес здесь представляют несквозные и в первую очередь (учитывая сравнительно малую толщину стенки трубы) поверхностные трещины. Такие дефекты имеют пространственный характер и в общем случае являются многопараметрическими. Современными методами эксплуатационного неразрушающего контроля полную исчерпывающую информацию о выявленном дефекте удастся получить лишь в некоторых отдельных случаях. В связи с этим в отечественной и зарубежной практике при неполноте информации о дефекте, а также для упрощения расчетных методик дефекты принято аппроксимировать трещиной полуэллиптической формы [3–16].

В настоящей статье рассматривается стальная труба 220×10, ослабленная несквозной полуэллиптической трещиной осевой ориентации, располагающейся на наружной поверхности. Размеры дефекта приняты следующими: глубина $l=5$ мм; полудлина $a=10$ мм. Труба находится под действием внутреннего давления $p=5$ МПа. Здесь выбрана достаточно толстостенная труба малого диаметра для усиления эффекта влияния кривизны оболочки на получаемые результаты.

Решение задачи механики разрушения проводится в САЕ-системе ANSYS с использованием программ-макросов, описанных в работе [17]. Моделируемый фрагмент стенки трубы с трещиной представлен на рис. 1.

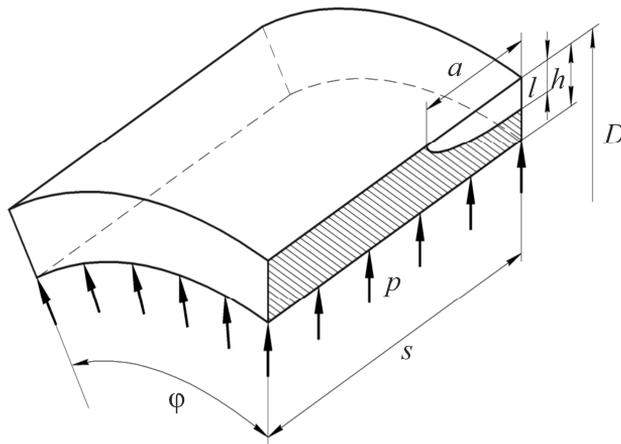


Рис. 1. Фрагмент трубы с осевой наружной трещиной:

$$s = 4\max(l, a); \quad \varphi = \frac{2s}{D}$$

Нагружение здесь осуществляется давлением p , которое прикладывается к внутренней поверхности трубы. В качестве граничных условий выступают условия симметрии, наложенные на все боковые грани рассматриваемого фрагмента. При этом они не оказывают какого-либо влияния на напряженно-деформированное состояние в области рассматриваемого дефекта, поскольку размеры фрагмента s и φ являются достаточно большими.

Конечно-элементная разбивка в окрестности трещины показана на рис. 2. Следует отметить, что использование здесь регулярной радиальной сетки в объеме, окружающем фронт трещины, обеспечивает высокую точность вычисления параметров механики разрушения.

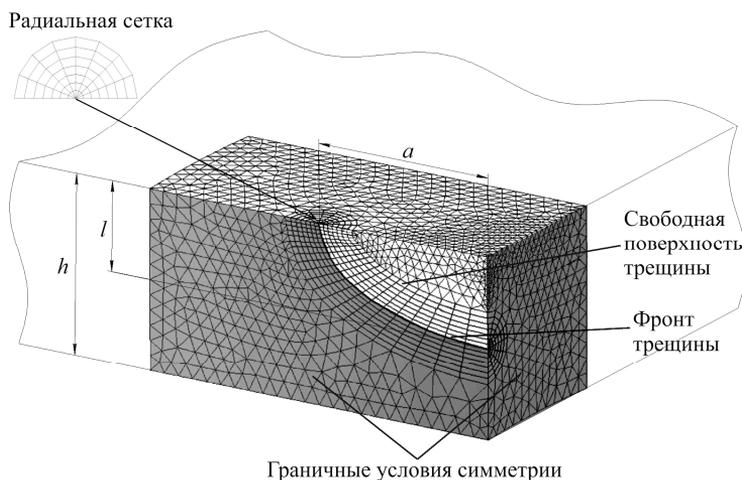


Рис. 2. Разбивка на конечные элементы

Расчет значений коэффициента интенсивности напряжений вдоль фронта дефекта выполняется по формуле

$$K_1(\theta) = \sqrt{\frac{E}{1-\mu^2}} J(\theta),$$

где E и μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала трубы; $J(\theta)$ – значения J -интеграла в точках фронта, определяемые численно методом интегрирования по области, который в настоящее время является наиболее точным при конечно-элементном моделировании; θ – угловая координата точки линии фронта [17].

Следует отметить, что в литературе содержится значительное количество формул для вычисления коэффициентов интенсивности напряжений в трубах и сосудах давления с поверхностными трещинами.

Так, в работах [18, 19] для расчета K_1 вдоль фронта продольной несквозной полуэллиптической трещины в цилиндрической оболочке, нагруженной внутренним давлением, приводится следующее выражение:

$$K_1(\theta) = \frac{pR_o}{h} \sqrt{\pi l} \frac{C_h C_c}{\Phi} \left(\sin^2 \theta + \frac{l^2}{a^2} \cos^2 \theta \right)^{0,25}, \quad (1)$$

где R_o и h – соответственно наружный радиус и толщина оболочки.

Под Φ здесь понимается полный эллиптический интеграл второго рода, вычисляемый по формуле

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \frac{a^2 - l^2}{a^2} \sin^2 \varphi} d\varphi = \sqrt{1 + 1,464 \left(\frac{l}{a}\right)^{1,65}}.$$

В выражении (1) величина C_h представляет собой поправку на геометрию трещины и определяется как

$$C_h = \frac{1 + 0,122 \left(1 - \frac{l}{2a}\right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{l}{a}\right)^4}},$$

а величина C_c имеет смысл поправки на кривизну и толщину оболочки и вычисляется по следующей формуле:

$$C_c = \left[0,481\alpha + 0,386e^{-1,25\alpha} + 0,614 - 1 \right] \frac{l}{h} - 1,$$

где $\alpha = \frac{a^2}{R_o h} \sqrt{12(1 - \mu^2)}$ – безразмерный параметр, характеризующий относительную длину трещины.

Другая наиболее используемая и опробованная формула вычисления коэффициентов интенсивности напряжений для цилиндрических сосудов давления с продольной несквозной полуэллиптической трещиной на внутренней или наружной поверхности имеет следующий вид [20]:

$$K_I(\theta) = 0,97 f_c F(\theta) \sigma \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}, \quad (2)$$

где f_c – поправка на кривизну оболочки, вычисляемая по формулам [21, 22]:

– для трещины на внутренней поверхности

$$f_c = \left[\frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + 1 - 0,5 \sqrt{\frac{a}{h}} \right] \frac{h}{R_i},$$

– для трещины на наружной поверхности

$$f_c = \left[\frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} - 1 + 0,5 \sqrt{\frac{a}{h}} \right] \frac{h}{R_i},$$

причем R_i и R_o – внутренний и наружный радиусы соответственно.

В формуле (2) под σ понимается среднее окружное напряжение

$$\sigma = \frac{p(R_o + R_i)}{2h}.$$

Величина Q находится по формуле

$$Q = 1 + 1,464 \left(\frac{l}{a} \right)^{1,65} = \Phi^2. \quad (3)$$

И, наконец, функция $F(\theta)$ определяется как

$$F(\theta) = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{h} \right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{h} \right)^4 \right] f(\theta) g(\theta),$$

где

$$M_1 = 1,13 - 0,09 \frac{l}{a};$$

$$M_2 = -0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \frac{l}{a}};$$

$$M_3 = 0,5 - \frac{1}{0,65 + \frac{l}{a}} + 14 \left(1 - \frac{l}{a} \right)^{24};$$

$$f(\theta) = \left[\left(\frac{l}{a} \right)^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \right]^{0,25};$$

$$g(\theta) = 1 + \left[0,1 + 0,35 \left(\frac{l}{h} \right)^2 \right] (1 - \sin \theta)^2.$$

Для поверхностных наружных полуэллиптических трещин осевой ориентации в цилиндрических сосудах в работе [23] для вычисления коэффициентов интенсивности напряжений в точках фронта дефекта приводится следующее выражение:

$$K_1(\theta) = \frac{pR_i}{h} \sqrt{\frac{\pi l}{Q}} F_e(\theta), \quad (4)$$

где Q находится по формуле (3); F_e – корректировочный коэффициент, определяемый как

$$F_e(\theta) = \frac{h}{R_i} \frac{R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \left[2G_0 + 2\frac{l}{R_o}G_1 + 3\left(\frac{l}{R_o}\right)^2 G_2 + 4\left(\frac{l}{R_o}\right)^3 G_3 \right].$$

Здесь G_j – коэффициенты влияния, значения которых представлены в таблицах, приведенных в работе [23].

Европейский стандарт SINTAP [24] и созданная в Великобритании методика оценки дефектов R6 [25] для вычисления коэффициентов интенсивности напряжений в отдельных точках фронта продольной полуэллиптической трещины на наружной поверхности бесконечно длинной трубы используют следующую формулу:

$$K_1 = \sqrt{\pi l} \sum_{i=0}^3 \sigma_i f_i \left(\frac{l}{h}, \frac{2a}{l}, \frac{R_i}{h} \right), \quad (5)$$

где σ_i – коэффициенты разложения окружных напряжений в неповрежденной части трубы в ряд

$$\sigma(u) = \sum_{i=0}^3 \sigma_i \left(\frac{u}{l} \right)^i.$$

Здесь u – координата, отсчитываемая от наружной поверхности трубы в направлении глубины дефекта (пределы изменения $0 \leq u \leq l$).

Коэффициенты f_i в формуле (5) представляют собой табулированные функции, зависящие от геометрических параметров трубы и дефекта. Для наиболее глубокой точки трещины и точек вблизи выхода дефекта на наружную поверхность значения коэффициентов приведены в стандарте [24].

Сравнение различных решений приведено на рис. 3, где показано распределение параметра K_1 по всему фронту рассматриваемой полуэллиптической трещины. Здесь сплошная линия 1 представляет наше решение, кривые 2, 3 и 4 построены с использованием соответственно выражений (1), (2) и (4), а кружочками отмечены результаты, рассчитанные по формуле (5).

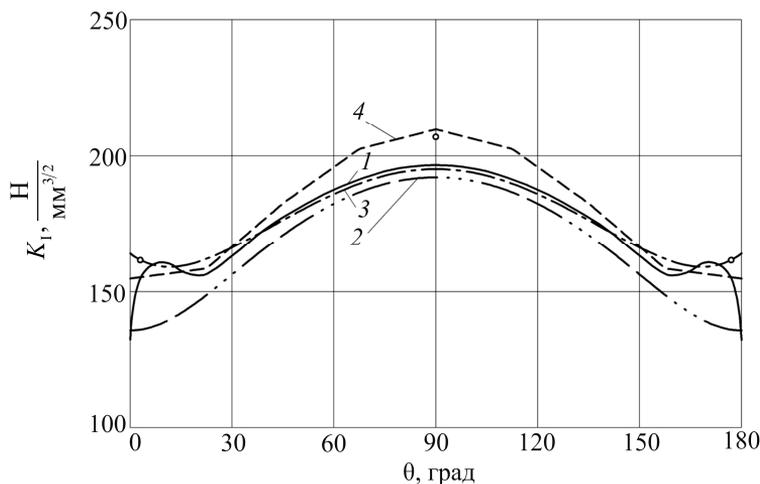


Рис. 3. Распределения коэффициента интенсивности напряжений вдоль фронта трещины

Как видно, наше решение, полученное при помощи САЕ-системы ANSYS, хорошо согласуется с результатами других авторов. При этом применение регулярной сетки с большим числом элементов вдоль фронта дефекта существенно повышает точность вычисления параметров механики разрушения и позволяет выявить наличие краевых эффектов в виде локальных максимумов, расположенных вблизи выхода трещины на поверхность трубы. Значения в этих точках выше, чем в конечных точках фронта, и именно их следует использовать для исследования роста трещины полуэллиптической формы при наличии пульсации давления. Как показывают результаты параметрических расчетов (в которых относительная глубина трещины l/h варьировалась в диапазоне от 0,1 до 0,8 с шагом 0,1, а относительная длина дефекта l/a изменялась от 0,1 до 2,0 с тем же шагом), подобные краевые эффекты наблюдаются и при других размерах трещины. Это можно объяснить тем, что на свободной поверхности тела определяющим является плоское напряженное состояние, а внутри тела – плоская деформация. Переход от одного состояния к другому и приводит к появлению краевого эффекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Библиографический список

1. Дефектность труб нефтепроводов и методы их ремонта: моногр. / А.Г. Гумеров, К.М. Ямалеев, Р.С. Гумеров, Х.А. Азметов; под общ. ред. А.Г. Гумерова. – М.: Недра, 1998. – 252 с.
2. Шлянников В.Н., Чадаев Д.А. Анализ изменения формы усталостной поверхностной трещины в трубопроводе // Проблемы прочности. – 2003. – № 5. – С. 80–92. DOI: 10.1023/B:STOM.0000004537.88053.77
3. Леонов В.П., Васильев А.К. Разработка подходов к нормированию технологической дефектности сварных соединений конструкций различного назначения // Вопросы материаловедения. – 2007. – № 3(51). – С. 187–203.
4. Мурзаханов Г.Х., Щугорев В.Н. Методы оценки конструкционной прочности нефтепроводов / под ред. В.П. Чиркова; Моск. энергетический ин-т. – М., 2009. – 71 с.
5. Мурзаханов Г.Х. Диагностика технического состояния и оценка остаточного ресурса магистральных трубопроводов: учеб. пособие / под ред. А.И. Владимирова, В.Я. Кершенбаума; Нац. ин-т нефти и газа. – М., 2005. – 72 с.
6. Li C.Q., Yang S.T. Stress intensity factors for high aspect ratio semi-elliptical internal surface cracks in pipes // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. – 2012. – Vol. 96–97. – P. 13–23. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2012.05.005
7. Diamantoudis A.T., Labeas G.N. Stress intensity factors of semi-elliptical surface cracks in pressure vessels by global-local finite element methodology // Eng. Fract. Mech. – 2005. – Vol. 72(9). – P. 1299–1312. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2004.10.004
8. Yang S.T., Ni Y.L., Li C.Q. Weight function method to determine stress intensity factor for semi-elliptical crack with high aspect ratio in cylindrical vessels // Eng. Fract. Mech. – 2013. – Vol. 109. – P. 138–149. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2013.05.014
9. Elastic–plastic fracture analyses for pipeline girth welds with 3D semi-elliptical surface cracks subjected to large plastic bending / Y.M. Zhang, D.K. Yi, Z.M. Xiao, Z.H. Huang, S.B. Kumar // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. – 2013. – Vol. 105–106. – P. 90–102. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2013.03.009
10. Chiodo M.S.G., Ruggieri C. J and CTOD estimation procedure for circumferential surface cracks in pipes under bending // Eng. Fract. Mech. – 2010. – Vol. 77(3). – P. 415–436. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2009.10.001

11. Madia M., Arafan D., Zerbst U. Reference load solutions for plates with semi-elliptical surface cracks subjected to biaxial tensile loading // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. – 2014. – Vol. 119. – P. 19–28. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2014.02.004

12. Lei Y. J-integral and limit load analysis of semi-elliptical surface cracks in plates under combined tension and bending // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. – 2004. – Vol. 81. – P. 43–56. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2003.12.002

13. Atroshchenko E., Potapenko S., Glinka G. Stress intensity factor for a semi-elliptical crack subjected to an arbitrary mode I loading // Mathematics and Mechanics of Solids. – 2014. – Vol. 19(3). – P. 289–298. DOI: 10.1177/1081286512463573

14. Predan J., Močilnik V., Gubelj N. Stress intensity factors for circumferential semi-elliptical surface cracks in a hollow cylinder subjected to pure torsion // Eng. Fract. Mech. – 2013. – Vol. 105. – P. 152–168. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2013.03.033

15. Shahani A.R., Habibi S.E. Stress intensity factors in a hollow cylinder containing a circumferential semi-elliptical crack subjected to combine loading // Int J Fatigue. – 2007. – Vol. 29. – P. 128–140. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2006.01.017

16. Linear and non-linear analyses for semi-elliptical surface cracks in pipes under bending / B. Mechab, B. Serier, B.B. Bouiadjra, K. Kaddouri, X. Feaugas // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. – 2011. – Vol. 88(1). – P. 57–63. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2010.11.001

17. Скворцов Ю.В., Глушков С.В. Моделирование несквозных поверхностных трещин в тонкостенных конструкциях // Вестник СГАУ. – 2011. – № 3(27). – Ч. 4. – С. 187–191.

18. Сапунов В.Т. Прочность поврежденных трубопроводов. Течь и разрушение трубопроводов с трещинами: учеб. пособие. – М.: Ком-Книга, 2005. – 192 с.

19. Erdogan P., Rotwani M. The use of COD and plastic instability in crack propagation and arrest in shells. Crack Propagation in Pipelines // Symp. Newcastle upon Tyne. – 1974. – P. 61–63.

20. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.

21. Bloom J.M. Validation of the deformation plasticity failure assessment diagram (DPFAD) approach – The case of an axial flaw in a pres-

surized cylinder // J. Pressure Vess. Techn. – 1990. – Vol. 112. – P. 213–217. DOI: 10.1115/1.2928616

22. Newman J.C., Raju I.S. Stress-intensity factors for internal surface cracks in cylindrical pressure vessels // J. Pressure Vess. Techn. – 1980. – Vol. 102(4). – P. 342–346. DOI: 10.1115/1.3263343

23. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2 т. Т. 2: пер. с англ. / под. ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 566 с.

24. SINTAP: Structural INTeegrity Assessment Procedures for European Industry: Final Revision // EU Project BE 95-1462. Brite Euram Programme. – Brussels, 1999.

25. Report R6 Revision 4. Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects // British Energy Generation Ltd. – Gloucester, UK, 2000.

References

1. Gumerov A.G., Iamaleev K.M., Gumerov R.S., Azmetov Kh.A. Defektnost' trub nefteprovodov i metody ikh remonta [Defectiveness of oil pipes and methods of repair]. Moscow: Nedra, 1998, 252 p.

2. Shlyannikov V.N., Chadaev D.A. Analysis of Shape Variation of a Fatigue Surface Crack in a Pipeline. *Strength of Materials*, 2003, vol. 35(5), pp. 490-499. DOI: 10.1023/B:STOM.0000004537.88053.77

3. Leonov V.P., Vasiliev A.K. Razrabotka podkhodov k normirovaniu tekhnologicheskoi defektnosti svarnykh soedinenii konstruktsii razlichnogo naznacheniia [Finding approaches to standardization of technological presence of defects in welded joints of structures of various purposes]. *Voprosy materialovedeniia*, 2007(51), no. 3, pp. 187-203.

4. Murzakhanov G.Kh., Shchugorev V.N. Metody otsenki konstruktsionnoi prochnosti truboprovodov [Methods for assessing the structural strength of pipelines]. *Moskovskii energeticheskii institut, MEI*, 2009. 71 p.

5. Murzakhanov G.Kh. Diagnostika tekhnicheskogo sostoianiia i otsenka ostatochnogo resursa magistral'nykh truboprovodov [Diagnosis and evaluation of the technical state of the residual resource pipelines]. Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2005. 72 p.

6. Li C.Q., Yang S.T. Stress intensity factors for high aspect ratio semi-elliptical internal surface cracks in pipes. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, 2012, vol. 96-97, pp. 13-23. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2012.05.005

7. Diamantoudis A.T., Labeas G.N. Stress intensity factors of semi-elliptical surface cracks in pressure vessels by global-local finite element

methodology. *Eng. Fract. Mech.*, 2005, 72(9), pp. 1299-1312. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2004.10.004

8. Yang S.T., Ni Y.L., Li C.Q. Weight function method to determine stress intensity factor for semi-elliptical crack with high aspect ratio in cylindrical vessels. *Eng. Fract. Mech.*, 2013, 109, pp. 138-149. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2013.05.014

9. Zhang Y.M., Yi D.K., Xiao Z.M., Huang Z.H., Kumar S.B. Elastic-plastic fracture analyses for pipeline girth welds with 3D semi-elliptical surface cracks subjected to large plastic bending. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, 2013, vol. 105-106, pp. 90-102. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2013.03.009

10. Chiodo M.S.G., Ruggieri C. J and CTOD estimation procedure for circumferential surface cracks in pipes under bending. *Eng. Fract. Mech.*, 2010, vol. 77(3), pp. 415-436. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2009.10.001

11. Madia M., Arafan D., Zerbst U. Reference load solutions for plates with semi-elliptical surface cracks subjected to biaxial tensile loading. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, 2014, vol. 119, pp. 19-28. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2014.02.004

12. Lei Y. J-integral and limit load analysis of semi-elliptical surface cracks in plates under combined tension and bending. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, 2004, vol. 81, pp. 43-56. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2003.12.002

13. Atroshchenko E., Potapenko S., Glinka G. Stress intensity factor for a semi-elliptical crack subjected to an arbitrary mode I loading. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 2014, vol. 19(3), pp. 289-298. DOI: 10.1177/1081286512463573

14. Predan J., Močilnik V., Gubelj N. Stress intensity factors for circumferential semi-elliptical surface cracks in a hollow cylinder subjected to pure torsion. *Eng. Fract. Mech.*, 2013, 105, pp. 152-168. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2013.03.033

15. Shahani A.R., Habibi S.E. Stress intensity factors in a hollow cylinder containing a circumferential semi-elliptical crack subjected to combine loading. *Int J Fatigue*, 2007, vol. 29, pp. 128-140. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2006.01.017

16. Mechab B., Serier B., Bouiadjra B.B., Kaddouri K., Feaugas X. Linear and non-linear analyses for semi-elliptical surface cracks in pipes under bending. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, 2011, vol. 88(1), pp. 57-63. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2010.11.001

17. Skvortsov Yu.V., Glushkov S.V. Modelirovanie neskvoznykh poverkhnostnykh treshchin v tonkostennykh konstruktsiakh [Modeling

non-through surface cracks in the thin-walled structures]. *Vestnik SGAU*, 2011, no. 3(27)-4, pp. 187-191.

18. Sapunov V.T. Prochnost' povrezhdennykh truboprovodov. Tech' i razrushenie truboprovodov s treshchinami [Durability of damaged pipelines. Flow and destruction of pipelines with cracks]. Moscow: KomKniga, 2005. 192 p.

19. Erdogan P., Rotwani M. The use of COD and plastic instability in crack propagation and arrest in shells. *Crack Propagation in Pipelines. Symp. Newcastle upon Tyne*, 1974, pp. 61-63.

20. Matvienko Yu.G. Modeli i kriterii mekhaniki razrusheniia [Models and criteria of fracture mechanics]. Moscow: Fizmatlit, 2006. 328 p.

21. Bloom J.M. Validation of the deformation plasticity failure assessment diagram (DPFAD) approach – The case of an axial flaw in a pressurized cylinder. *J. Pressure Vess. Techn.*, 1990, vol. 112, pp. 213-217. DOI: 10.1115/1.2928616

22. Newman J.C., Raju I.S. Stress-intensity factors for internal surface cracks in cylindrical pressure vessels. *J. Pressure Vess. Techn.*, 1980, vol. 102(4), pp. 342-346. DOI: 10.1115/1.3263343

23. Murakami Y. *Stress Intensity Factors Handbook*. Elmsford NY (USA). Pergamon Books, 1987. 1566 p.

24. SINTAP: Structural INTEGRITY Assessment Procedures for European Industry: Final Revision. *EU Project BE 95-1462*. Brite Euram Programme. Brussels, 1999.

25. Report R6 Revision 4. Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects. *British Energy Generation Ltd*. Gloucester, UK, 2000.

Об авторах

Глушков Сергей Валериевич (Самара, Россия) – ассистент кафедры космического машиностроения Самарского государственного аэрокосмического университета (443086, Московское шоссе, 34, г. Самара, e-mail: proch@ssau.ru).

Скворцов Юрий Васильевич (Самара, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры космического машиностроения Самарского государственного аэрокосмического университета (443086, Московское шоссе, 34, г. Самара, e-mail: proch@ssau.ru).

Перов Сергей Николаевич (Самара, Россия) – доктор технических наук, доцент, доцент кафедры космического машиностроения Самарского государственного аэрокосмического университета (443086, Московское шоссе, 34, г. Самара, e-mail: perov@imi-samara.ru).

About the authors

Sergey V. Glushkov (Samara, Russian Federation) – Assistant of Department of Space Engineering, Samara State Aerospace University (34, Moskovskoye shosse, 443086, Samara, Russian Federation, e-mail: proch@ssau.ru).

Yurii V. Skvortsov (Samara, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Ass. Professor, Department of Space Engineering, Samara State Aerospace University (34, Moskovskoye shosse, 443086, Samara, Russian Federation, e-mail: proch@ssau.ru).

Sergey N. Perov (Samara, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Ass. Professor, Department of Space Engineering, Samara State Aerospace University (34, Moskovskoye shosse, 443086, Samara, Russian Federation, e-mail: perov@imi-samara.ru).

Получено 23.07.2014

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Глушков С.В., Скворцов Ю.В., Перов С.Н. Сравнение результатов решения задачи механики разрушения для трубы с несквозной трещиной // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 3. – С. 36–49. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.03

Please cite this article in English as:

Glushkov S.V., Skvortsov Yu.V., Perov S.N. Comparison of the results of solving the problem of fracture mechanics for pipe with non-through crack. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014. No. 3. Pp. 36-49. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.03