DOI: 10.18454/PMI.2017.1.93

УДК 622.691.12

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ ТРУБЫ

А.К.НИКОЛАЕВ[1], АЛЬФРЕДО ЛАЗАРО КОЭЙО ВЕЛАСКЕС[2]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Горно-металлургический институт, Моа, Республика Куба*

В статье рассмотрено актуальное для нефтегазовой промышленности применение труб, изготовленных из высокопрочных композитных материалов, стойких к коррозии. С целью повышения эксплуатационной надежности промысловых трубопроводов целесообразно применение композитных труб из стеклопластика. Из-за высокой коррозионной активности перекачиваемой среды более половины от общего числа аварий, возникающих на нефтяных промыслах, приходится на долю нефтесборных систем. Для уменьшения числа аварий и улучшения экологической безопасности необходимо решить проблему повышения долговечности промысловых нефтепроводов. Решением этой проблемы могут быть композитные материалы из стеклопластика, которые обладают необходимыми физико-механическими свойствами для эксплуатации труб на нефтяных промыслах. Прочностные характеристики регулируются способом намотки стеклопластика, количеством слоев в композитном материале и высокой коррозионной стойкостью стеклопластика. Применение на нефтяных промыслах высокопрочных композитных материалов из стеклопластика является экономически выгодным; производство труб из стеклопластика более дешевое, чем из стали. Стеклопластик обладает малым удельным весом, что облегчает транспортировку и укладку труб. С целью определения эффективности применения высокопрочных композитных материалов на нефтяных промыслах проведено исследование их физико-механических свойств и моделирование процесса разрушения стеклопластиковой трубы.

***Ключевые слова*:** нефтепроводы, композитные материалы, стеклопластик, процесс разрушения, уравнения равновесия, напряжение, деформация, критерии разрушения

***Как цитировать эту статью*:** Николаев А.К. Моделирование процесса разрушения стеклопластиковой трубы / А.К.Николаев, Альфредо Лазаро Коэйо Веласкес // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 93-98. DOI 10.18454/PMI.2017.1.93

Введение. В настоящее время на территории России эксплуатируются более 350 тыс. км промысловых трубопроводов [1]. Ежегодно на промысловых нефтепроводах происходит до 70 тыс. аварий. Причиной аварий в преобладающем большинстве случаев являются коррозионные разрушающие процессы; 55 % от общего числа аварий приходится на долю нефтесборных систем, а 30-35 % – на долю коммуникаций поддержания пластового давления; 42 % труб на промысловых нефтепроводах не выдерживают пяти лет эксплуатации, а 17 % труб – даже двух лет [4]. На ежегодную замену труб в нефтепромысловых сетях расходуется около 7-8 тыс. км труб, что эквивалентно примерно 400-500 тыс. т стали [3]. Однако, на промыслах часто происходят аварии, связанные с износом стальных трубопроводов из-за коррозионной активности перекачиваемой среды. От этого возрастают затраты на аварийный ремонт линейной части промысловых трубопроводов.

Средний срок службы промысловых трубопроводов – от нескольких месяцев до 15 лет. В результате отказов происходит загрязнение окружающей среды, снижение добычи нефти, повышение капитальных затрат на капитальный ремонт трубопроводов и на мероприятия по охране окружающей среды. Основными причинами данных отказов являются: недостаточные меры по защите промысловых трубопроводов от коррозии, сокращение расходов на обновление труб с антикоррозионным покрытием, отклонение от строительных норм и правил на этапе строительно-монтажных работ [6]. В условиях высокой коррозионной активности применяемые стальные трубы часто имеют завышенную толщину стенки, в результате чего принимается больший запас прочности.

Методика экспериментальных исследований. В качестве объекта исследования использованы критерии разрушения многослойных композитных труб.

Основной целью анализа критериев разрушения композиционного материала является определение прочностных характеристик, а так же модели возникновения возможного разрушения материала под воздействием напряжений. В композиционных трубах модель разрушения проявляется потерей герметичности стенки с трещинообразованием в матрице и нарушением адгезии в зоне взаимодействия волокон с матрицей. Для определения модели развития разрушения исследователями был предложен ряд критериев. Для того, чтобы описать модель разрушения волокна и повреждения матрицы, Хашин [10] вывел критерии усталости. Джонс и Халл [11] с помощью микроскопических исследований провели анализ механизма разрушения стеклопластиковых

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.93

труб и обнаружили, что потеря герметичности происходит из-за возникновения поперечных трещин, а при высоких нагрузках из-за отслоения слоев. Фрост и Червенка [9] проводили исследования на осевое и кольцевое растяжение стеклопластиковых труб и обнаружили, что матричные трещины проходят по толщине слоя параллельно волокнам без разрыва самого волокна. Эмпирическим путем ими был определен следующий критерий разрушения, при намотке стеклопластиковой трубы под углами в ± 45, ± 55 и ± 75°:

$$\left(\frac{\sigma_\tau}{\sigma_{\tau\text{рра}}}\right)^2+\left(\frac{\tau}{\tau_{\text{раз}}}\right)^2+C\left(\frac{\sigma_\tau\tau}{\sigma_{\tau\text{раз}}\tau_{\text{раз}}}\right)=1,$$

где σ_τ, τ – напряжение и сдвиг при заданной нагрузке; $\sigma\tau_{\text{раз}}$, $\tau_{\text{раз}}$ и C – свойства материала.

Процессы разрушения полимерного волокнистого материала происходят в несколько этапов. На первом этапе происходит разрушение первого слоя композитного материала (First Ply Failure). После него слоистый материал еще способен нести нагрузку. Второй этап – общее разрушение слоев, сопровождается разрушением последнего слоя материала (Ultimate Laminate Failure). Некоторые критерии позволяют моделировать разрушение первого слоя, но большая их часть описывает только критическое разрушение всего материала. Разрушение композиционного материала определяется не только физико-механическими свойствами элементов материалов, но и его внутренней структурой. Разрушение армирующих волокон, раскол связующей матрицы, разрушение поверхности сопряжения или межфазной границы вызываются разными механизмами и требуют разных подходов к моделированию процесса разрушения. При приведении материала со сложной структурой к однородному анизотропному материалу стираются внутренние границы сопряжений, что приводит к расхождению с экспериментальными данными.

Для математического моделирования процесса разрушения волокнистого композитного материала прменяются: критерий максимального напряжения Цая – Хилла; критерий Цая – Ву; критерий Хашина; критерий Пака.

Критерий максимального напряжения в композитном слое описывает нагрузки, возникающие при растяжении и сжатии материала. Когда напряжение, параллельное или перпендикулярное к оси волокна, достигает соответствующего критического значения, верно следующее выражение [8]:

$$\sigma_1 \geq \sigma_1^*,\ \ \sigma_2 \geq \sigma_2^*,\ \ \tau_{12} \geq \tau_{12}^*.$$

Значение величины σ_x, необходимое для разрушения композиционного материала в случае приложенного одноосного растяжения, представлено как функция угла φ между напряжением и осью волокна для каждого из трех режимов разрушения:

$$\sigma_x^* = \frac{\sigma_1^*}{\cos^2\varphi} = \frac{\sigma_2^*}{\sin^2\varphi} = \frac{\tau_{12}^*}{\cos\varphi\sin\varphi}.$$

Деформация в осевом и кольцевом направлении определяется следующим образом:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \upsilon_{yx}\frac{\sigma_y}{E_y},$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \upsilon_{xy}\frac{\sigma_x}{E_x},$$

$$\gamma_{xy} = \tau_{xy} = 0.$$

Деформация в параллельном и перпендикулярном направлении волокна:

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \gamma_{12}\end{bmatrix} = [T']\begin{bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \gamma_{xy}\end{bmatrix},\quad [T'] = \begin{bmatrix}c^2 & s^2 & cs\\ s^2 & s^w & -cs\\ -2cs & 2cs & c^2-s^2\end{bmatrix},$$

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.93

где ε_1, ε_2 – деформации параллельно и перпендикулярно расположенных волокон; γ_{12} –деформация сдвига; *c* и *s* – сокращение для cosυ, sinυ.

Математическое выражение критерия Цая – Хилла:

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1^*}\right)^2+\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_2^*}\right)^2-\left(\frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_2^{*2}}\right)+\left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12}^*}\right)^2=1.$$

Критерий Цая – Ву включает взаимосвязь с деформацией сдвига, которая не рассматривается в критерии Цая – Хилла. Он является одним из наиболее распространенных критериев, используемых для моделирования процесса разрушения композиционных материалов, позволяет определить достаточно точно прочностные характеристики без экспериментальных данных:

$$F_i\sigma_i + F_j\sigma_i\sigma_j \le 1,$$

где σ – приложенное напряжение; F_i, F_j – параметры прочности; $i, j = 1, 2, 3,\ldots6$.

Предполагается, что волокнисто-композиционный материал с полимерным связующим и наполнителем можно рассмотреть как однородное тело с одним выделенным направлением, вдоль которого механические характеристики различаются. Выделенное направление совпадает с направлением армирующего волокна. Процесс разрушения описывается в случае выполнения одного из пяти условий, каждое из которых определяет модель разрушения: растяжение или сжатие волокон, расслоение материала и т.д.

При моделировании процесса разрушения волокнисто-композиционной трубы предполагается, что волокнистая структура стенки трубы соответствует углу намотки стеклопластикового слоя, содержащего ряд четных слоев однонаправленного армирующего волокна [7].

Общий закон Гука, описывающий напряжено-деформированное состояние, может быть выражен следующим образом:

$$\sigma = C_{ij}\varepsilon j,$$

где σ – компоненты напряжения, которые изображены на рис.1 в трех координатных осях *x*, *y*, *z*; *i*, *j* = 1,…6; C_{ij}, ε_j – матрица жесткости и компонент деформации.

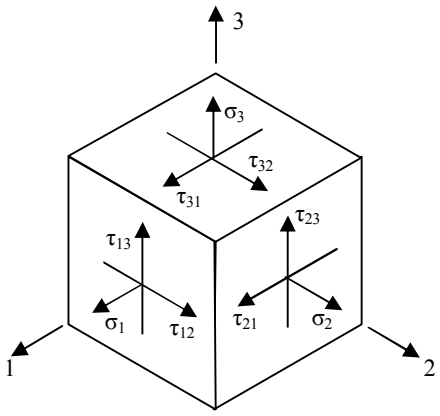


Рис.1. Напряжение в элементе в трех координатных осях

Деформация определяется с помощи выражений:

$$\varepsilon_1=\frac{\partial u}{\partial x},\quad \varepsilon_2=\frac{\partial v}{\partial y},\quad \varepsilon 3=\frac{\partial w}{\partial z},$$

$$\gamma_{23}=\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial y},\quad \gamma_{31}=\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z},\quad \gamma_{12}=\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x},$$

где *u*, *v*, *w* – перемещения на координатных осях *x*, *y*, *z*.

Упругие свойства однонаправленного слоистого стеклопластикового материала рассчитываются с использованием теории микромеханики композитных структур (рис.2). Уравнение предельного напряжения [2] и критерий Холпина – Цая [5] используются для определения упругих свойств однонаправленного композитного слоя в главных осях из следующих уравнений:

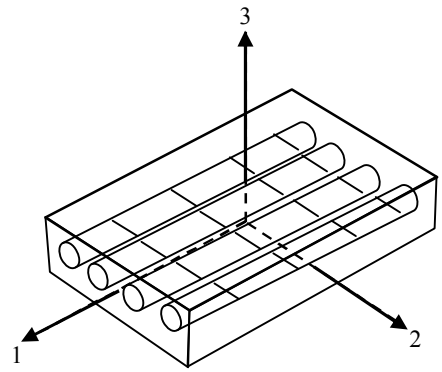


Рис.2. Однонаправленный армированный слой

уравнения смеси

$$E_1 = E_fV_f + E_mV_m,$$

$$\upsilon_{12} = \upsilon_fV_f + \upsilon_mV_m;$$

равенства Холпина – Цая

$$E_2=\frac{1+\xi\eta_в V_f}{1-\eta_в V_f},\quad G_2=\frac{1+\xi\eta_g V_f}{1-\eta_g V_f},$$

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.93

$$\eta_{в} = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi}, \qquad \eta_{g} = \frac{\frac{G_f}{G_m} - 1}{\frac{G_f}{G_m} + \xi},$$

где E_1 и E_2 – продольные и поперечные модули упругости армирующего слоя композита; G_{12} – модуль сдвига; υ_{12} – коэффициент Пуассона; V_f, E_f, E_m, G_f, G_m – модуль упругости и сдвига армирующего волокна (f) и матрицы (m) в слоистом материале,

$$G_f = \frac{E_f}{2(1+V_f)}; \qquad G_m = \frac{E_m}{2(1+V_m)}.$$

Стенка стеклопластиковой трубы представляет собой часть слоистого материала и обладает ортотропными упругими свойствами, которые в значительной степени зависят от угла намотки θ. Таким образом, напряженно-деформированное состояние слоистого композитного материала может быть выражено следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ y_{12} \end{pmatrix},$$

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1-\upsilon_{12}\upsilon_{21}}; \quad Q_{12} = \frac{\upsilon_{12}E_1}{1-\upsilon_{12}\upsilon_{21}} = \frac{\upsilon_{21}E_2}{1-\upsilon_{12}\upsilon_{21}}; \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1-\upsilon_{12}\upsilon_{21}}; \quad Q_{66} = G_{12},$$

где Q_{11}, Q_{12}, Q_n – матрицы жесткости; E_1 и E_2 – модуль упругости главных осей в слоистом материале.

В случае укладки армирующих слоев при произвольном угле относительно главных осей матрица преобразования используется для приложенных напряжений и деформаций в осевом и радиальном направлении:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{axial} \\ \sigma_{hoop} \\ \tau_{ax/hp} \end{pmatrix} = [T]^{-1} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = [T]^{-1}[Q] \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{1}{2}\gamma_{12} \end{pmatrix} = [T]^{-1}[Q][T] \begin{pmatrix} \varepsilon_{axial} \\ \varepsilon_{hoop} \\ \frac{1}{2}\gamma_{ax/hp} \end{pmatrix} = [\overline{Q}] \begin{pmatrix} \varepsilon_{axial} \\ \varepsilon_{hoop} \\ \gamma_{ax/hp} \end{pmatrix},$$

где $[\overline{Q}]$ – параметр жесткости матрицы.

В ходе алгебраических преобразований соотношение между $[\overline{Q}]$ и $[Q]$ матриц выражается следующим образом:

$$\overline{Q}_{11} = Q_{11}\cos^4\theta + Q_{11}\sin^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta,$$

$$\overline{Q}_{22} = Q_{11}\sin^4\theta + Q_{11}\cos^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta,$$

$$\overline{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})\sin^2\theta + Q_{11}\cos^2\theta + Q_{12}(\sin^4\theta\cos^4\theta),$$

$$\overline{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})\sin\theta\cos^3\theta - ((Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})\sin^3\theta\cos\theta),$$

$$\overline{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})\sin^3\theta\cos\theta - ((Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})\sin\theta\cos^3\theta),$$

$$\overline{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta + 2Q_{66}(\cos^4\theta + \sin^4\theta),$$

где θ – угол намотки композитного слоя в кольцевом и осевом направлении; предполагается, что слои являются однородными и ортотропными.

DOI: *10.18454/PMI.2017.1.93*

С использованием преобразованного параметра жесткости матрицы упругие свойства стенки трубы в осевом и радиальном направлениях описываются как:

$$E_{\text{ос}} = \overline{Q}_{11}(1 - \upsilon_{\text{ос}}\,\upsilon_{\text{кол}}),$$

$$E_{\text{кол}} = \overline{Q}_{22}(1 - \upsilon_{\text{ос}}\,\upsilon_{\text{кол}}),$$

$$\upsilon_{\text{ос}} = \frac{\overline{Q}_{12}}{Q_{22}},\ \upsilon_{\text{кол}} = \frac{\overline{Q}_{12}}{Q_{11}},\ G_{\text{ос/кол}} = \overline{Q}_{66}.$$

На рис.3 показана схема укладки и деформации армирующих волокон стеклопластиковой трубы. Деформации, вызванные напряженным состоянием, определяются следующими соотношениями:

$$\varepsilon_{\text{ос}} = \frac{\sigma_{\text{ос}}}{E_{\text{ос}}} - \upsilon_{\text{кол/ос}}\frac{\sigma_{\text{кол}}}{E_{\text{кол}}},$$

$$\varepsilon_{\text{кол}} = \frac{\sigma_{\text{кол}}}{E_{\text{кол}}} - \frac{\sigma_{\text{ос}}}{E_{\text{ос}}},$$

$$\gamma_{\text{ос/кол}} = \frac{\tau_{\text{ос/кол}}}{G_{\text{ос/кол}}},$$

где $E_{\text{кол}}$, $E_{\text{ос}}$ – модули упругости в продольном и поперечном направлениях.

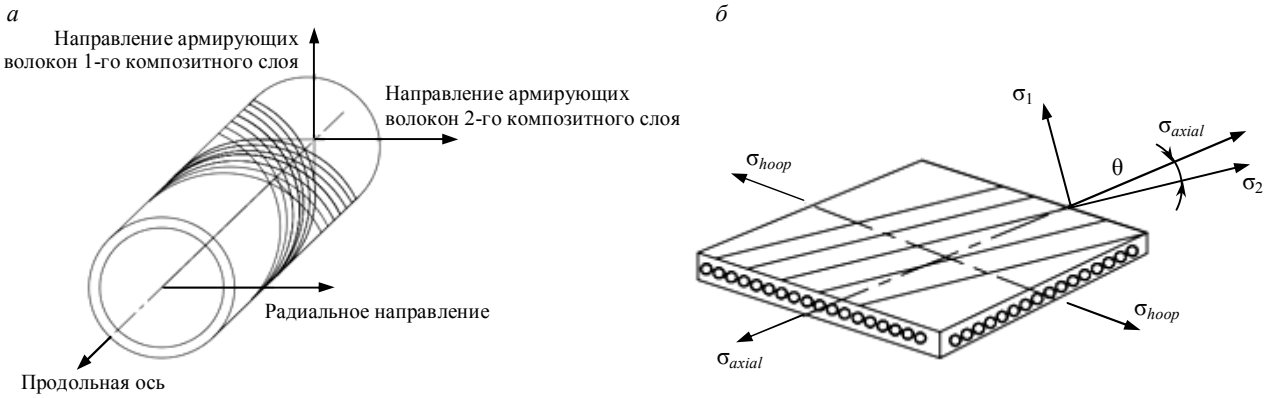


Рис.3. Схема укладки (*а*) и деформации (*б*) армирующих волокон стеклопластиковой трубы

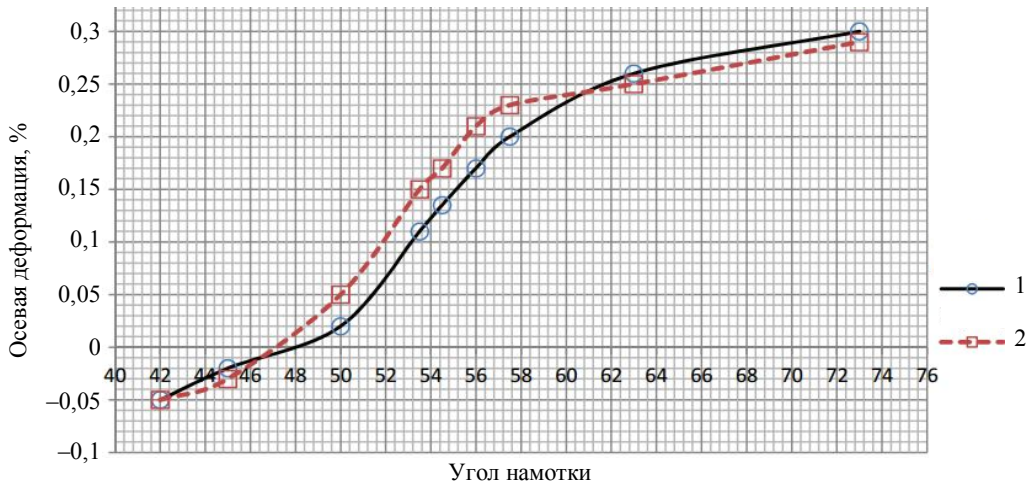


Рис.4. Сравнение экспериментальных данных (1) с критерием Цая – Ву (2)

Теория слоистых материалов дает довольно точные результаты в прогнозировании осевых и кольцевых деформаций в стеклопластиковых трубах вследствие двуосной нагрузки. В таблице и на рис.4 приведены сравнения данных, полученных в ходе экспериментальных испытаний стеклопластиковой трубы с теоретическими расчетами.

Сравнение теоретических расчетов зависимости осевой деформации от угла намотки стеклопластиковой трубы с экспериментальными данными

Угол намотки	Экспериментальные данные			Теория слоистых материалов		
	Давление, МПа	$\varepsilon_{ос}$, %	$\varepsilon_{кол}$, %	$\varepsilon_{ос}$, %	$\varepsilon_{кол}$, %	Критерий Цая – Ву
42,00	95	–0,05	0,48	–0,05	0,51	0,9
45,00	120	–0,02	0,60	–0,03	0,58	1,1
50,00	130	0,02	0,50	0,05	0,51	0,9
53,50	170	0,11	–	0,15	0,57	1,2
54,50	166	0,13	–	0,17	0,54	1,1
57,50	160	0,20	–	0,24	0,46	1,0
63,00	110	0,26	–	0,25	0,27	1,0
73,00	92	0,29	–	0,31	0,19	1,0

Выводы

Проведено теоретическое исследование процесса разрушения волокнистых композитных материалов. Подробно описываются критерии разрушения композитных материалов, необходимые для моделирования процесса разрушения в стеклопластиковых трубах. Предлагается возможное решение актуальной на нефтяных промыслах проблемы повышения коррозионной стойкости промысловых трубопроводов. Одно из потенциальных направлений борьбы с коррозией – применение труб, изготовленных из высокопрочных композитных волокнистых материалов, которые обладают необходимыми прочностными характеристиками и отвечают физико-механическим требованиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бобылев Л.М.* Труба или решето? // Нефть России. 2000. № 1. С. 64-68.
2. *Варфоломеева Л.* Информационные технологии на службе нефтегазовой отрасли России // Нефть России. 2004. № 9. С. 24-25.
3. *Зайцев К.И.* Пластмассовые трубы – перспектива замены стальных труб на нефтепромыслах // Строительство трубопроводов. 1996. № 4-5. С. 7-11.
4. *Карнаухов М.Л.* Справочник мастера по подготовке газа / М.Л.Карнаухов, В.ВА.Кобычев. М.: Инфра Инженерия, 2009. С. 256.
5. *Касьяненко В.* Биологический фактор коррозии // Нефть Газ Промышленность. 2004. № 6 (11). С. 18-20.
6. *Ягубов Э.З.* Композиционно-волокнистые трубы в нефтегазовом комплексе / Э.З.Ягубов, И.Ю.Быков. М: Центр ЛитНефтеГаз, 2008. С. 271.
7. *Abdul Majid M.S.* Effect of Angeles in biaxial ultimate elastic wall stress (UEWS) / M.S.Abdul Majid, M.Afendi, R.Daud, M.Hekman // 2nd International Conference on Sustainable Materials, 2013. P. 424-428.
8. *Agarwal B.D.* Analysis and Performance of Fiber Composites / B.D.Agarwal, L.J.Broutman // John Wiley & Sons, Inc., 1990.
9. *Frost S.R.* Glass fibre-reinforced epoxy matrix filament wound pipes for use in the oil industry / S.R.Frost, A.Cervenka // Composites Manufacturing. 1994. № 5(2). P. 73-81.
10. *Hashin Z.* A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials / Z.Hashin, A.Rotem // Journal of Composite Materials. 1973. № 7(4). P. 448-464.
11. *Jones M.L.C.* Microscopy of failure mechanisms in filament wound pipes / M.L.C.Jones, D.Hull // Materials Science. 1979. № 14. P. 165-174.

***Авторы*: А.К.Николаев**, *д-р техн.наук, профессор, aleknikol@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **Альфредо Лазаро Коэйо Веласкес,** *доктор наук, профессор, acoellov@nauta.cu* (*Горно-металлургический институт, Моа, Республика Куба*)
Статья принята к публикации 10.10.2016.