

# Основные принципы построения расчетной модели поврежденных участков трубопровода с композитными накладками в программном комплексе ANSYS

<sup>1</sup>\*ЖАҢАБАЙ Нұрлан Жаңабайұлы, к.т.н., профессор, Nurlan.Zhanabay777@mail.ru,

<sup>1</sup>ТҰРСҰНҚҰЛҰЛЫ Тимур, PhD, доцент, Timurtursunkululy@gmail.com,

<sup>1</sup>ИБРАИМОВА Ұлжан Бахытжанқызы, PhD, старший преподаватель, ibraimova\_uljan@mail.ru,

<sup>1</sup>УТЕЛБАЕВА Акмарал Болысбековна, д.х.н., ассоциированный профессор, mako\_01-777@mail.ru,

<sup>1</sup>НАО «Южно-Казахстанский университет имени Мухтара Ауэзова», пр. Тауке хана, 5, Шымкент, Казахстан,

\*автор-корреспондент.

**Аннотация.** Модель газопровода расположена между четырьмя опорами. В качестве дефекта рассмотрена сквозная трещина. Разработана методика численного моделирования основных ключевых параметров бандажа в виде круговых композитных накладок: типа композитного материала, длины накладки и толщины накладки. Представленную методику расчета рекомендуется использовать в программном комплексе ANSYS. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании традиционных и усиленных композитными накладками магистральных стальных газопроводов. Также описанная методика расчета может быть использована при численных исследованиях натуральных и уменьшенных моделей магистральных стальных газопроводов с учетом эксплуатационных нагрузок в вопросе повышения прочностных характеристик.

**Ключевые слова:** магистральный стальной газопровод, эксплуатационные нагрузки, композитная накладка, моделирование, повреждение.

## Введение

Бандажирование поврежденных участков магистральных трубопроводов для нефти широко применяется при разработке мероприятий по повышению срока безопасной эксплуатации нефтепроводов в сейсмически опасных районах. В настоящее время все чаще используются композитные накладки, что вызвано их высокой прочностью, долговечностью, устойчивостью к коррозии и механическим нагрузкам. При проектировании бандажа на поврежденные участки трубопроводов оптимальные параметры композитной накладки: длина, толщина и свойства материала, целесообразно определять на основе расчетных исследований [1, 2].

Предварительно проведенные исследования типового участка магистрального трубопровода между четырьмя опорами с повреждениями в виде утонения исходной толщины трубы и сквозных трещин показали,

что наличие накладки из углепластика толщиной не более половины толщины трубы, полностью компенсирует концентрацию напряжений в зоне повреждений [3]. Исследования проводились численно в программном комплексе Ansys. Также исследовались изменения спектра собственных частот поврежденных участков трубопровода, усиленных композитными накладками, в зависимости от размеров и места расположения накладки. Получено, что упрочненная композитной накладкой труба имеет более высокий спектр частот колебаний, по сравнению с неупрочненной [3]. Поэтому нанесение композитных накладок можно использовать как способ отстройки поврежденных участков от критических низких частот. Также определено, что формы колебаний бандажированного композитной накладкой закрепленного участка трубы с повреждениями мало отличаются от форм колебаний такого же участ-

ка трубы без накладки.

Таким образом, при проектировании композитных накладок на поврежденные участки трубопровода целесообразно проводить расчетные исследования, которые должны включать:

- оценку напряженно-деформированного состояния упрочненного композитной накладкой поврежденного участка трубы при рабочем внутреннем давлении;

- оценку динамической прочности и анализ возможного разрушения упрочненного поврежденного участка трубы при увеличении внутреннего давления до критического давления в нефтепроводе;

- определение влияния композитной накладки на спектр собственных частот и форм колебаний бандажированного участка трубы между опорами.

Такие расчеты позволяют оптимизировать композитную накладку с целью обеспечения безаварийной работы бандажированных участков трубопроводов в сейсмически опасных районах. Для проведения вышеназванных расчетов необходимо произвести достоверное моделирование параметров и материала комбинированной конструкции. В связи с чем целью данной работы явля-

ется предварительное моделирование механических свойств материала композитной накладки. Полученные результаты данной работы в последующем будут применяться при моделировании магистрального газопровода с учетом эксплуатационных нагрузок.

### Методы исследования

Рассматривается уменьшенная модель линейной части магистрального трубопровода между опорами: одна крайняя опора реализует условия жесткой заделки трубы, две внутренние опоры являются свободно-подвижными, вторая крайняя опора реализует условия заделки трубы с возможностью перемещений в продольном направлении (рисунок 1). Линейные размеры модели в продольном направлении представлены на рисунке 1 в миллиметрах. Диаметр трубы модели трубопровода равен 300 мм, а толщина стенки трубы – 0,8 мм. Материал трубопровода – сталь марки С245 с пределом текучести 240 МПа и пределом прочности 360 МПа.

Внутренняя поверхность трубы нагружена равномерно распределенным стационарным давлением. Как показали предвари-

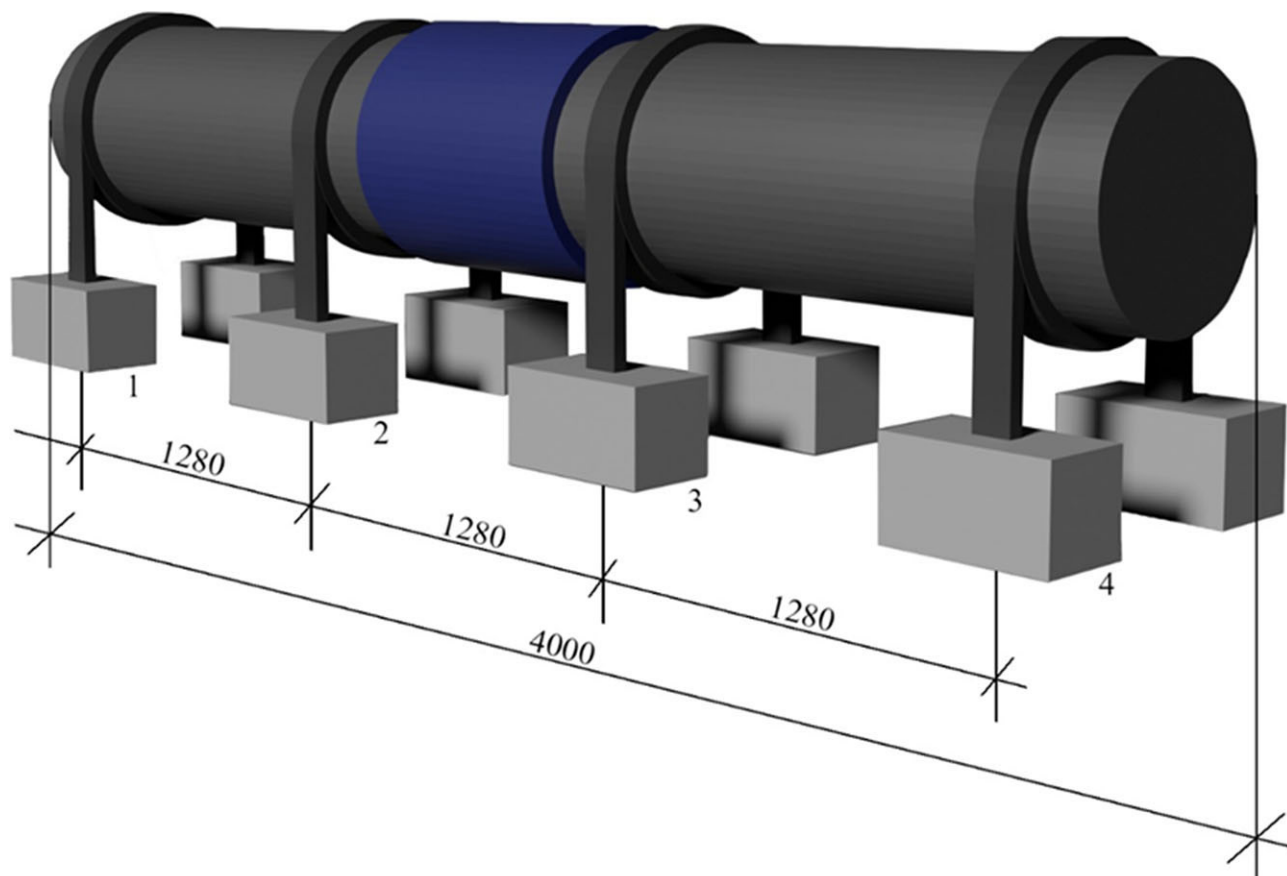


Рисунок 1 – Схема модели линейной части магистрального трубопровода

тельные исследования [3], такое давление вызывает практически равномерное напряженное состояние в неповрежденной трубе на линейном участке трубопровода между крайними опорами. При этом свободно-подвижные опоры существенно не влияют на осесимметричный характер распределения напряжений в осевом сечении трубы [3] и для данного исследования их можно не учитывать.

Критическое давление определяется из конечно-элементного расчета. Его величина равняется величине внутреннего давления, которое вызывает напряженное состояние в трубе между опорами, равное пределу текучести материала. Для исследуемой модели линейной части трубопровода (рисунок 2) критическое давление составляет  $P_{кр} = 6,426$  кПа.

На рисунке 2 приведена схема размещения композитной наклейки. Основные механические свойства композитной наклейки приведены в работе [3].

### Научные результаты

Для последующих правильных расчетов было проведено предварительное моделирование параметров и механических свойств материала комбинированной уменьшенной модели магистрального стального газопровода усиленными композитными наклейками.

*Моделирование механических свойств материала композитной наклейки*

При проведении расчетных исследований статической и динамической прочности участков стальной трубы с композитными наклейками необходимо учитывать тот факт, что композитный материал не является изотропным, в общем случае он анизотро-

пен. В настоящее время для бандажирования стальных труб широко используется ремонтная система мокрой укладки монолитного типа [1, 2]. При этом армирующие волокна в композитном материале располагают таким образом, что композитная наклейка обладает свойствами ортотропии, т.е. удовлетворяет закону Гука в такой форме:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{\phi\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{\phi\phi} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

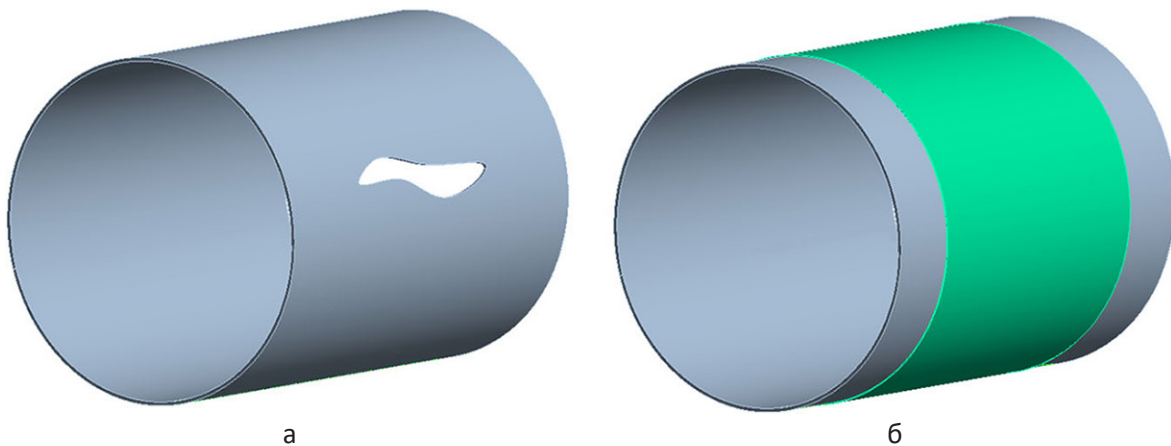
$$\sigma_{x\phi} = 2\bar{C}_{66}\epsilon_{x\phi}, \sigma_{xz} = 2\bar{C}_{55}\epsilon_{xz}, \sigma_{\phi z} = 2\bar{C}_{44}\epsilon_{\phi z},$$

где  $\sigma_{xx}, \sigma_{\phi\phi}, \sigma_{x\phi}, \sigma_{xz}, \sigma_{\phi z}, \epsilon_{xx}, \epsilon_{\phi\phi}, \epsilon_{x\phi}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{\phi z}$  – элементы тензоров напряжений и деформаций в цилиндрической системе координат.

Для обеспечения правильного учета ортотропных свойств материала композитной наклейки в расчетной модели поврежденного участка трубопровода между опорами в ANSYS применяется специальная процедура определения направления осей ортотропии в композитной наклейке.

Наиболее часто для ремонта стальных труб применяются наклейки из стеклопластика или углепластика. Для описания ортотропных механических свойств наклейки при численном моделировании используются такие экспериментальные константы:

- модуль Юнга в направлении вдоль трубы  $E_{xx}$ ;
- модуль Юнга в окружном направлении  $E_{\phi\phi}$ ;
- модуль Юнга в направлении внешней нормали к трубе  $E_{zz}$ ;
- модули сдвига в соответствии с осями цилиндрической системы координат  $G_{x\phi}, G_{\phi z}, G_{xz}$ ;
- коэффициенты Пуассона в соответствии с осями цилиндрической системы ко-



а – без наклейки; б – с наклейкой [3]

Рисунок 2 – Модель трубы с трещиной

ординат  $v_{x\phi}, v_{\phi z}, v_{xz}$ ;  
 - плотность  $\rho$ .

Заметим, что накладка моделируется как трехмерное тело с ортотропными свойствами материала, а не ортотропная пластина. Это позволяет построить более точную расчетную модель конструкции и более точно учесть изменение напряженного состояния по толщине накладки. Также такое трехмерное моделирование позволяет численно исследовать процесс разрушения участка трубопровода.

При статических и динамических исследованиях деформирования и колебаний поврежденного участка стальной трубы с композитной накладкой предполагается, что в зоне контакта эти части конструкции жестко соединены между собой. Исследуется стальная труба, учитывается билинейная зависимость между напряжениями и деформациями при упругопластическом деформировании [3]. Механические характеристики предельных значений используются следующие: предел текучести и предел прочности.

*Моделирование длины композитной накладки в зависимости от площади повреждения участка трубопровода с учетом возможного разрушения конструкции*

Определение длины композитной накладки  $l_{cw}$  осуществляется по формуле [4]:

$$l_{cw} = s_p + 2(s_{ul} + s_{ol}), \quad (2)$$

где  $s_p$  – длина дефекта вдоль трубы;  $s_{ol}$  – длина нахлеста, соответствующая расстоянию, на которое композитная накладка перекрывает дефект;  $s_{ul}$  – длина проекции скоса края накладки на ось трубы.

На выбор оптимальной величины суммы ( $s_{ul} + s_{ol}$ ) и направлено предварительное численное моделирование бандажа.

Существуют упрощенные методики расчета длины накладки [4], однако они не учитывают все особенности нагружения конструкции. Поэтому для выявления наиболее приемлемой длины композитной накладки рекомендуется определять ее путем моделирования методом конечных элементов [1]. При этом упрощенные аналитические методики могут служить для проверки достоверности конечно-элементной модели при тестовых расчетах. Так, согласно исследованиям, представленным в работе [4], значения  $s_{ol}$  и  $s_{ul}$  можно определить по формулам:

$$s_{ol} = \max[1.77\sqrt{D_e t_n}; 38 \text{ мм}], \quad (3)$$

$$s_{ul} \geq 1.1 t_{cw}, \quad (4)$$

номинальная толщина трубы;  $t_{cw}$  – толщина композитной накладки.

Эти формулы справедливы только для значений толщины композитной накладки  $t_{cw}$ , не превышающей величины  $D_e/6$ , как указано в [4]. Поэтому уравнение (3) может использоваться для определения начального значения  $s_{ol}$  для последующего его уточнения с использованием численного анализа методом конечных элементов в ANSYS.

Таким образом, для определения длины композитной накладки согласно зависимости (2) величина  $s_p$  задается на основе замера зоны дефекта трубы, величина  $s_{ul}$  определяется согласно зависимости (4), а величина  $s_{ol}$  вычисляется путем решения динамической задачи распространения трещины вдоль трубы при заданной внутренней нагрузке в ANSYS.

*Моделирование толщины композитной накладки в зависимости от глубины повреждений в трубе с учетом возможного разрушения*

Для определения толщины композитной накладки в настоящее время разработано несколько приближенных методов [5]. Они базируются на оценке остаточной механической прочности поврежденной трубы до ее ремонта и прочности усиленной композитной накладкой трубы.

Для оценки остаточной механической прочности вводится коэффициент остаточной прочности  $RSF$  для трубы с дефектами [1]. Оригинальный метод расчета этого коэффициента следующий:

$$RSF = \begin{cases} 1.1 \frac{1 - 2/3 \cdot d_{rd}}{1 - 2/3 \cdot d_{rd}/M}, & s_{rd}^2 \leq 20, \\ 1.1(1 - d_{rd}), & s_{rd}^2 > 20 \end{cases}, \quad (5)$$

$$M = \sqrt{1 + 0,8 s_{rd}^2},$$

где  $d_{rd} = d_{max}/t_n$  – относительная глубина дефекта потери металла;  $d_{max}$  – максимальная глубина дефекта потери металла;  $t_n$  – номинальная толщина трубы;  $S_{rd}$  – относительная длина дефекта потери металла.

Начальное значение толщины композитной накладки  $t_{cw}$  определяется на основе полученного значения коэффициента остаточной прочности  $RSF$  по методу, предложенному производителем композитного материала на основе углепластика [4]:

$$t_{cw} = t_n \frac{R_{yp}}{R_{mcc}} \frac{f_d(1 - RSF)}{f \cdot f_t}, \quad (6)$$

где  $R_{yp}$  – предел текучести стальной трубы;  $R_{mcc}$  – кратковременная прочность композитного материала на растяжение в окружном направлении;  $f_d$  – коэффициент конструкции трубы;  $f$  – коэффициент эксплуатации,

используемый для композитного проектирования;  $f_t$  – температурный коэффициент снижения номинальных характеристик.

Уравнение (6) имеет ограничение: толщина композитной накладки  $t_{cw}$  не должна превышать величину  $D_e/6$ .

Нужно отметить, что толщина композитной накладки, полученная согласно уравнению (6), дает заниженную величину [1]. Поэтому оно используется для определения начального значения. А оптимальная толщина композитной накладки определяется из дополнительных исследований методом конечных элементов.

Таким образом, толщина композитной накладки определяется путем решения задачи упругопластического деформирования участка упрочненной трубы между опорами при заданном внутреннем давлении на основе конечно-элементного численного моделирования в ANSYS.

#### *Оптимизация композитных накладок*

Эффективность технологии ремонта стальных труб с коррозионными и трещиноподобными дефектами напрямую зависит от выбора трех ключевых параметров композитных накладок. Это композитный материал, длина накладки и толщина накладки. Изменение композитного материала и геометрических параметров накладки может снизить вес бандажированной трубы, минимизировать затраты на ее ремонт, повысить долговечность и прочность укрепленного участка трубы с дефектами.

Оптимизацию композитных накладок с целью достижения номинальной прочности бандажированной трубы при минимальном весе накладки и при максимальной экономии композитного материала целесообразно проводить путем численного моделирования. При этом, как правило, выбор композитного материала осуществляется предварительно. Поэтому целью оптимизации является определение минимальной длины и минимальной толщины композитной накладки, которая обеспечит статическую и динамическую прочность бандажированного участка трубопровода с дефектом между опорами на уровне прочности этого участка трубопровода без дефекта.

Используются основные принципы метода градиентного спуска. Он позволяет находить независимые локальные экстремумы функций минимальной толщины и минимальной длины композитной накладки [6].

Для минимальной толщины накладки  $x_k$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$ , можно записать:

$$x_{k+1} = x_k - \alpha \nabla f(x_k), \quad (7)$$

где  $\alpha$  – шаг при нахождении минимальной толщины,  $\nabla f(x_k)$  – градиент функции в точке  $x_k$ .

Для минимальной длины накладки  $y_k$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$ , можно записать:

$$y_{k+1} = y_k - \beta \nabla g(y_k), \quad (8)$$

где  $\beta$  – шаг при нахождении минимальной длины,  $\nabla g(y_k)$  – градиент функции в точке  $y_k$ .

Исходные данные для уравнений (7) и (8) определяются из конечно-элементного анализа в ANSYS [7], а корректировка геометрических параметров композитной накладки осуществляется на основе анализа результатов численного моделирования.

#### **Выводы**

На базе типовой уменьшенной модели линейной части стального магистрального трубопровода между четырьмя опорами с трещиноподобным сквозным дефектом разработаны методики численного моделирования трех ключевых параметров бандажа в виде круговых композитных накладок: типа композитного материала, длины накладки и толщины накладки. Эти методики целесообразно использовать при проектировании композитных накладок на поврежденные участки трубопровода для удешевления ремонтных работ и обеспечения надежности эксплуатации бандажированных участков. Численное моделирование предлагается проводить в программном комплексе ANSYS на основе разработанных расчетных моделей. В качестве материал накладки предлагается определять как упругий углепластик, стеклопластик или как любой другой материал с упругими ортотропными механическими характеристиками. Таким образом полученные результаты в дальнейшем могут использоваться при моделировании как натурных, так и уменьшенных магистральных стальных газопроводов с учетом эксплуатационных нагрузок в вопросе повышения прочностных характеристик.

*Исследование проводилось в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан ИРН AP19680589 «Разработка научных основ сопротивляемости магистральных газопроводов протяженному лавинному разрушению».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dumitrescu, A.; Minescu, M.; Dinita, A.; Lambrescu, I. Corrosion Repair of Pipelines Using Modern Composite Materials Systems: A Numerical Performance Evaluation // *Energies*. – 2021. – No. 14. – 615 p. <https://doi.org/10.3390/en14030615>
2. Shafae Fallah, A., Sadeghian, M., & Golmakani, M.E. Experimental and Numerical Study on the Strength of Repaired Steel Pipes with Composite Patches under Internal Pressure // *Mechanics of Advanced Composite Structures*. – 2023. – No. 10 (2). – Pp. 437-448. doi: 10.22075/mac.2023.29108.1459
3. Moldagaliyev A., Zhangabay N., Suleimenov U., Avramov K., Raimberdiyev T., Chernobryvko M., Umbitaliyev A., Jumabayev A., & Yeshimbetov S. Deformation features of trunk pipelines with composite linings under static loads. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2023. – Volume 5, Issue 7 (125). – Pp. 34-42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287025>
4. Williamson, T.D. RES-Q Wrap Design & Installation of RES-QTM // *Composite Wrap on Pipelines*. – 2012.
5. Zecheru G., Dumitrescu A., Diniță A., & Yekhymets P. Design of composite repair systems // *Non-destructive Testing and Repair of Pipelines*. – 2018. – Pp. 269-285.
6. Kiwiel K. Convergence and efficiency of subgradient methods for quasiconvex minimization // *Math. Program.* – 2001. – No. 90. – Pp. 1-25. <https://doi.org/10.1007/PL00011414>
7. Moldagaliyev A., Zhangabay N., Bonopera M., Raimberdiyev T., Yeshimbetov S., Galymzhan S., Anarbayev Y. Finite-Element Analysis of Oscillations in Damaged Pipeline Sections Reinforced with a Composite Material // *Modelling and Simulation in Engineering*. – 2024. – No. 15. – Pp. 2827002. <https://doi.org/10.1155/2024/2827002>

### **ANSYS бағдарламалық кешенінде композиттік төсемдері бар зақымдалған құбыр учаскелерінің есептік моделін құрудың негізгі принциптері**

**<sup>1</sup>\*ЖАҢАБАЙ Нұрлан Жаңабайұлы**, т.ғ.к., профессор, [Nurlan.Zhanabay777@mail.ru](mailto:Nurlan.Zhanabay777@mail.ru),

**<sup>1</sup>ТҰРСҰНҚҰЛҰЛЫ Тимур**, PhD, доцент, [Timurtursunkululy@gmail.com](mailto:Timurtursunkululy@gmail.com),

**<sup>1</sup>ИБРАИМОВА Ұлжан Бахытжанқызы**, PhD, аға оқытушы, [ibraimova\\_uljan@mail.ru](mailto:ibraimova_uljan@mail.ru),

**<sup>1</sup>УТЕЛБАЕВА Акмарал Болысбековна**, х.ғ.д., қауымдастырылған профессор, [mako\\_01-777@mail.ru](mailto:mako_01-777@mail.ru),

<sup>1</sup>«Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті» КеАҚ, Тәуке хан даңғылы, 5, Шымкент, Қазақстан,

\*автор-корреспондент.

**Аңдатпа.** Болат магистралды құбырдың сызықтық бөлігінің типтік кішірейтілген моделі негізінде сызат тәрізді ақауы бар төрт тірек арасында дөңгелек композиттік төсемдер түрінде жолақтың негізгі параметрлерін сандық модельдеу әдістері жасалды: композициялық материалдың түрі, төсемнің ұзындығы және төсемнің қалыңдығы. Ұсынылған есептеу техникасын ANSYS бағдарламалық кешенінде қолдану ұсынылады. Алынған нәтижелерді дәстүрлі және композиттік төсемдермен күшейтілген магистральдық болат газ құбырларын модельдеу кезінде пайдалануға болады. Сондай-ақ сипатталған есептеу әдістемесі беріктік сипаттамаларын арттыру мәселесінде пайдалану жүктемелерін ескере отырып, магистралды болат газ құбырларының табиғи және кішірейтілген модельдерін сандық зерттеу кезінде қолданыла алады.

**Кілт сөздер:** магистралды болат газ құбыры, пайдалану жүктемелері, композиттік төсем, модельдеу, зақымдану.

### **The Basic Principles of Constructing A Computational Model of Damaged Pipeline Sections with Composite Linings in The ANSYS Software Package**

<sup>1</sup>\*ZHANGABAY Nurlan, Cand. of Tech. Sci., Professor, Nurlan.Zhanabay777@mail.ru,  
<sup>1</sup>TURSUNKULULY Timur, PhD, Associate Professor, Timurtursunkululy@gmail.com,  
<sup>1</sup>IBRAIMOVA Ulzhan, PhD, Senior Lecturer, ibraimova\_uljan@mail.ru,  
<sup>1</sup>UTELBAYEVA Akmaral, Dr. of Chem. Sci., Associate Professor, mako\_01-777@mail.ru,  
<sup>1</sup>NCJSC «Mukhtar Auezov South Kazakhstan University», Tauke Khan Avenue, 5, Shymkent, Kazakhstan,  
 \*corresponding author.

**Abstract.** In the article, based on a typical reduced model of the linear part of a steel main pipeline between four supports with a crack-like through defect, methods for numerical modeling of the main key parameters of the bandage in the form of circular composite linings are developed: the type of composite material, the length of the lining and the thickness of the lining. The presented calculation method is recommended to be used in the ANSYS software package. The results obtained can be used in modeling traditional and reinforced with composite linings main steel gas pipelines. Also, the described calculation method can be used for numerical studies of full-scale and reduced models of main steel gas pipelines, taking into account operational loads in the issue of increasing strength characteristics.

**Keywords:** main steel gas pipeline, operational loads, composite lining, modeling, damage.

#### REFERENCES

1. Dumitrescu, A.; Minescu, M.; Dinita, A.; Lambrescu, I. Corrosion Repair of Pipelines Using Modern Composite Materials Systems: A Numerical Performance Evaluation // Energies. – 2021. – No. 14. – 615 p. <https://doi.org/10.3390/en14030615>
2. Shafae Fallah, A., Sadeghian, M., & Golmakani, M.E. Experimental and Numerical Study on the Strength of Repaired Steel Pipes with Composite Patches under Internal Pressure // Mechanics of Advanced Composite Structures. – 2023. – No. 10 (2). – Pp. 437-448. doi: 10.22075/mac.2023.29108.1459
3. Moldagaliyev A., Zhangabay N., Suleimenov U., Avramov K., Raimberdiyev T., Chernobryvko M., Umbitaliyev A., Jumabayev A., & Yeshimbetov S. Deformation features of trunk pipelines with composite linings under static loads. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Volume 5, Issue 7 (125). – Pp. 34-42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287025>
4. Williamson, T.D. RES-Q Wrap Design & Installation of RES-QTM // Composite Wrap on Pipelines. – 2012.
5. Zecheru G., Dumitrescu A., Diniță A., & Yukhymets P. Design of composite repair systems // Non-destructive Testing and Repair of Pipelines. – 2018. – Pp. 269-285.
6. Kiwiel K. Convergence and efficiency of subgradient methods for quasiconvex minimization // Math. Program. – 2001. – No. 90. – Pp. 1-25. <https://doi.org/10.1007/PL00011414>
7. Moldagaliyev A., Zhangabay N., Bonopera M., Raimberdiyev T., Yeshimbetov S., Galymzhan S., Anarbayev Y. Finite-Element Analysis of Oscillations in Damaged Pipeline Sections Reinforced with a Composite Material // Modelling and Simulation in Engineering. – 2024. – No. 15. – Pp. 2827002. <https://doi.org/10.1155/2024/2827002>