

Научная статья

УДК 621.792.4; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-28-39

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РАЗМЕРОВ КОМПОЗИТНОГО БАНДАЖА ДЛЯ РЕМОНТА УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА С ОПАСНЫМ ДЕФЕКТОМ**

**Андрюшкин Александр Юрьевич;**

**Булыгин Владимир Вячеславович.**

**Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»**

**им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия.**

**Кадочникова Елена Николаевна.**

**Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева,**

**Санкт-Петербург, Россия**

*Аннотация.* Дефекты в стенках эксплуатируемых трубопроводов возникают из-за химического и физико-механического воздействия транспортируемых под высоким внутренним давлением жидких или газообразных углеводородов, а также из-за отрицательного влияния внешней среды. Актуальная проблема обеспечения безопасности и увеличения остаточного ресурса эксплуатируемых трубопроводов требует поиска эффективных технических решений по их ремонту и восстановлению. Ремонт дефектного участка трубопровода с помощью композитного бандажа позволяет повысить его несущую способность и увеличить срок службы. В статье разработана методика определения конструктивных размеров композитного бандажа для ремонта трубопровода с опасным дефектом. Рассмотрены условия, характеризующие текущее состояние трубопровода, при выполнении которых необходима установка композитного бандажа. В методике учтены механические характеристики материала трубы и композитного бандажа, влияние концентрации напряжений из-за наличия опасного дефекта. Композитный бандаж формируют намоткой препрега на наружную поверхность трубы с опасным дефектом. Представлен расчёт конструктивных размеров стеклопластикового бандажа для ремонта дефектной трубы из стали 09Г2С по предложенной методике.

*Ключевые слова:* композитный бандаж, препрег, трубопровод, дефект, ремонт, расчет конструктивных размеров

**Для цитирования:** Андрюшкин А.Ю., Булыгин В.В., Кадочникова Е.Н. Определение конструктивных размеров композитного бандажа для ремонта участка трубопровода с опасным дефектом // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 1 (77). С. 28–39. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-28-39

Scientific article

## **DETERMINATION OF THE STRUCTURAL DIMENSIONS OF A COMPOSITE BANDAGE FOR REPAIRING A PIPELINE SECTION WITH A DANGEROUS DEFECT**

**Andryushkin Aleksander Yu.;****Bulygin Vladimir V.****Baltic state technical university «VOENMEH» of D.F. Ustinov, Saint-Petersburg, Russia.****Kadochnikova Elena N.****Military educational institution of logistics named after general of the army****A.V. Khrulyov, Saint-Petersburg, Russia**

*Abstract.* Defects in the walls of operated pipelines occur due to the chemical and physico-mechanical effects of liquid or gaseous hydrocarbons transported under high internal pressure, as well as due to the negative effects of the external environment. The urgent problem of ensuring the safety and increasing the remaining life of the operated pipelines requires the search for effective technical solutions for their repair and restoration. Repair of a defective section of the pipeline using a composite bandage makes it possible to increase its bearing capacity and increase its service life. The article develops a method for determining the structural dimensions of a composite bandage for repairing a pipeline with a dangerous defect. The conditions characterizing the current condition of the pipeline, which require the installation of a composite bandage, are considered. The method takes into account the mechanical characteristics of the pipe material and composite bandage, the influence of stress concentration due to the presence of a dangerous defect. A composite bandage is formed by winding a prepreg onto the outer surface of a pipe with a dangerous defect. The calculation of the structural dimensions of a fiberglass bandage for repairing a defective pipe made of 09G2C steel according to the proposed method is presented.

*Keywords:* composite bandage, prepreg, pipeline, defect, repair, calculation of structural dimensions

**For citation:** Andryushkin A.Yu., Bulygin V.V., Kadochnikova E.N. Determination of the structural dimensions of a composite bandage for repairing a pipeline section with a dangerous defect // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 1 (77). P. 28–39. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-28-39

### **Введение**

В настоящее время большие объемы углеводородов, как в жидком, так и в газообразном состоянии, транспортируют по трубопроводам под высоким внутренним давлением. В случае нарушения работоспособности участка трубопровода он является потенциальным источником возникновения аварии или чрезвычайной ситуации. Снижение работоспособности эксплуатируемого трубопровода обусловлено возникновением дефектов и повреждений его стенки из-за физико-химического воздействия транспортируемых углеводородов и окружающей среды. Поэтому проблема обеспечения безопасности и увеличения остаточного ресурса трубопровода актуальна и требует поиска эффективных технических решений.

Традиционно дефектные участки трубопроводов усиливают, приваривая в местах повреждений накладку и пластины. При этом вес трубопровода растет, а сварные швы подвергаются коррозии и усталостному разрушению. Также сварка сопровождается высокотемпературным воздействием на металл трубопровода, что ухудшает его прочностные свойства.

Исключить недостатки, возникающие при использовании традиционной технологии ремонта трубопровода с помощью сварки, позволяет применение внешнего армирования полимерными композитами на основе углеродных, арамидных и стеклянных волокон. Армированные непрерывными волокнами полимерные композиты характеризуются высокой прочностью, большей, чем у трубных сталей, малым весом, коррозионной стойкостью, отсутствием высокотемпературного воздействия на материал трубы, а также простотой монтажа на поврежденный трубопровод. Результаты опубликованных исследований и испытаний, посвященных применению полимерных композитов для усиления металлических конструкций, показывают, что получаемые соединения являются достаточно универсальными и надежными, и потому их применение постоянно расширяется [1–12].

Одним из путей решения проблемы обеспечения безопасности и увеличения остаточного ресурса трубопровода является усиление его потенциально опасного участка композитным бандажом, увеличивающим несущую способность его стенки с дефектом. Вследствие этого актуальна задача определения конструктивных размеров композитного бандажа.

Целью исследования является разработка методики расчета конструктивных размеров композитного бандажа для усиления потенциально опасного участка трубопровода и обеспечения его безопасности.

Задачи исследования.

1. Разработка методики определения размеров композитного бандажа для ремонта дефектного участка трубопровода.
2. Расчёт по предложенной методике конструктивных размеров стеклопластикового бандажа стального трубопровода с опасным дефектом.

### Методика определения размеров композитного бандажа для ремонта дефектного участка газопровода

При ремонте на потенциально опасный участок трубопровода устанавливают композитный бандаж, охватывающий трубу. Технология усиления поврежденного участка трубопровода рассмотрена в работах [11–17]. Для формирования композитного бандажа сначала послойно наматывают под натяжением на наружную поверхность трубы препрег – пропитанную неотвержденным полимерным связующим ткань. Чаще всего, используют термореактивное связующее «холодного» отверждения, которое полимеризуется при температуре 15–40 °С. Далее полимерное связующее отверждается, образуя полимерную матрицу, обеспечивающую совместную работу нитей ткани, распределение нагрузки между ними, а также химическую стойкость композиционного материала.

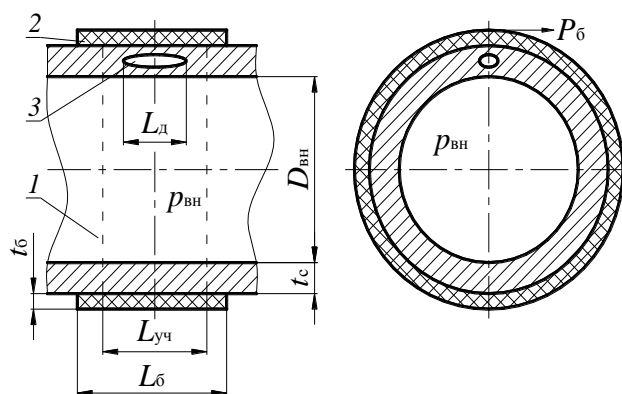


Рис. Участок трубопровода с композитным бандажом:

1 – труба; 2 – композитный бандаж;

3 – дефект;  $p_{вн}$  – внутреннее рабочее давление в трубе;  $D_{вн}$  – внутренний диаметр трубы;  $t_c$  – толщина стенки трубы;  $L_{уч}$  – длина дефектного участка;  $t_b$  – толщина стенки композитного бандажа;  $L_b$  – длина композитного бандажа;  $L_d$  – длина дефекта;

$P_0$  – усилие натяжения препрега при намотке

Установка бандажа на дефектном участке трубопровода (рисунок) необходима в том случае, если выполняется хотя бы одно из двух условий:

1. Коэффициент безопасности по давлению  $m_p \leq [m_p]$ , где  $[m_p]$  – допустимый коэффициент безопасности по давлению.
2. Коэффициент запаса прочности трубы  $n_{зс} \leq [n_{зс}]$ , где  $[n_{зс}]$  – допустимый коэффициент запаса прочности трубы.

Коэффициент безопасности по давлению  $m_p$ :

$$m_p = \frac{p_{\text{раз}}}{p_{\text{вн}}} \geq [m_p], \quad (1)$$

где  $m_p$  – коэффициент безопасности по давлению;  $p_{\text{раз}}$  – расчетное внутреннее давление разрушения трубы с опасным дефектом, Па;  $p_{\text{вн}}$  – внутреннее рабочее давление в трубе, Па.

Расчетное внутреннее давление разрушения трубы связано с размерами опасного дефекта выражением [11–17]:

$$p_{\text{раз}} = \frac{\sigma_{\text{теч}} \cdot t_c}{0,5 \cdot D_{\text{вн}}} \cdot \left( \frac{t_c - K_d \cdot h_d}{t_c - K_d \cdot h_d \cdot (M_d)^{-1}} \right), \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{теч}}$  – напряжение течения материала трубы, Па;  $D_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубы, м;  $t_c$  – толщина стенки трубы, м;  $K_d$  – коэффициент, учитывающий конфигурацию опасного дефекта ( $K_d=0,7$ );  $h_d$  – глубина опасного дефекта, м;  $M_d$  – коэффициент Фолиаса.

Напряжение течения материала трубы при сроке эксплуатации до 15 лет [11–17]:

$$\sigma_{\text{теч}} = 0,95 \cdot (0,5 \cdot (\sigma_{\text{тс}} + \sigma_{\text{вс}})), \quad (3)$$

где  $\sigma_{\text{тс}}$  – предел текучести материала трубы, Па;  $\sigma_{\text{вс}}$  – предел прочности материала трубы, Па. Коэффициент Фолиаса [11–17]:

$$M_d = \left( 1 + 1,32 \cdot \frac{(0,5 \cdot L_d)^2}{0,5 \cdot D_{\text{вн}} \cdot t_c} \right)^{0,5}, \quad (4)$$

где  $L_d$  – длина продольной проекции опасного дефекта, м.

Коэффициент запаса прочности трубы  $n_{зс}$ :

$$n_{зс} = \frac{\sigma_{\text{тс}}}{\sigma_{\text{кс}}} \geq [n_{зс}], \quad (5)$$

где  $n_{зс}$  – коэффициент запаса прочности трубы;  $\sigma_{\text{кс}}$  – действующие кольцевые напряжения в трубе, Па.

Влияние опасного дефекта, например, крупной трещины, на величину действующих кольцевых напряжений в трубе учитывается величиной коэффициента концентратора напряжений:

$$\sigma_{\text{кс}} = 0,5 \cdot \alpha \cdot p_{\text{вн}} \cdot \frac{D_{\text{вн}}}{t_c}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент концентрации напряжений.

Композитный бандаж испытывает растягивающие напряжения и создает сжимающее усилие на наружную поверхность трубы, нагруженной внутренним рабочим давлением, повышая ее несущую способность (рисунок).

Основными конструктивными размерами композитного бандажа являются его длина  $L_{\delta}$  и толщина стенки  $t_{\delta}$ , которые рассчитываются с учетом внутреннего рабочего давления, геометрических и механических характеристик трубопровода, а также характеристик дефектов, выявленных в процессе обследования его текущего состояния.

Композитный бандаж должен, по возможности, располагаться симметрично дефектному участку по длине трубопровода, а длина композитного бандажа  $L_{\delta}$  должна перекрывать длину дефектного участка  $L_{yч}$ :

$$L_{\delta} = L_{yч} + D_{вн} + 2 \cdot t_c, \quad (7)$$

где  $L_{yч}$  – длина дефектного участка трубопровода, м;  $L_{\delta}$  – длина композитного бандажа, м.

Толщина стенки композитного бандажа:

$$t_{\delta} = n_{\delta} \cdot t_{сл\delta}, \quad (8)$$

где  $t_{\delta}$  – толщина стенки композитного бандажа, м;  $n_{\delta}$  – число слоев композитного бандажа, шт;  $t_{сл\delta}$  – толщина слоя композитного бандажа, м.

Число слоев композитного бандажа, полученного намоткой препрега на участок трубопровода с опасным дефектом [11–17]:

$$n_{\delta} = 0,5 \cdot p_{вн} \cdot D_{вн} \cdot \frac{\alpha - 1}{\sigma_{к\delta} \cdot t_{сл\delta} - P_{\delta}}, \quad (9)$$

где  $P_{\delta}$  – усилие натяжения при намотке слоя препрега, Н/м;  $\sigma_{к\delta}$  – действующие кольцевые напряжения в композитном бандаже, Па.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние дефектного участка трубы с композитным бандажом и определим действующие кольцевые напряжения в композитном бандаже  $\sigma_{к\delta}$ . Труба с композитным бандажом при действии внутреннего рабочего давления будет находиться в равновесии в кольцевом направлении при выполнении следующего условия:

$$\sigma_{к\delta} \cdot t_c - \sigma_{к\delta} \cdot t_{\delta} = 0,5 \cdot p_{вн} \cdot D_{вн}.$$

Труба и композитный бандаж совместно воспринимают нагрузку, создаваемую внутренним рабочим давлением, тогда действующие кольцевые напряжения в композитном бандаже [11–17]:

$$\sigma_{к\delta} = \left( \varepsilon_k + (\sigma_{пс} - \nu_c \cdot \sigma_{к\delta}) \cdot \frac{\nu_{пк\delta}}{E_c} \right) \cdot \frac{E_{к\delta}}{1 - \nu_{пк\delta} \cdot \nu_{кп\delta}}, \quad (10)$$

где  $E_{к\delta}$  – модуль упругости Юнга материала композитного бандажа в кольцевом направлении, Па;  $\varepsilon_k$  – относительная деформация трубы с композитным бандажом;  $\nu_{пк\delta}$  – коэффициент Пуассона от действия продольных напряжений в кольцевом направлении композитного бандажа;  $\nu_{кп\delta}$  – коэффициент Пуассона от действия кольцевых напряжений в продольном направлении композитного бандажа;  $\nu_c$  – коэффициент Пуассона трубы;  $E_c$  – модуль упругости Юнга материала трубы, Па;  $\sigma_{пс}$  – действующие продольные напряжения в трубе, Па.

Относительная деформация трубы [11–17]:

$$\varepsilon_k = (2 \cdot \sigma_{kc} - \sigma_{nc}) \cdot \frac{\varepsilon_{nc}}{2 \cdot \sigma_{nc}} + \frac{1 - 2 \cdot \nu_c}{E_c} \cdot \frac{\sigma_{nc} + \sigma_{kc}}{3}, \quad (11)$$

где  $\varepsilon_{nc}$  – интенсивность линейной относительной деформации трубы;  $\sigma_{nc}$  – интенсивность нормальных напряжений в трубе, Па.

Интенсивность нормальных напряжений в трубе:

$$\sigma_{nc} = (\sigma_{nc}^2 + \sigma_{kc}^2 - \sigma_{nc} \cdot \sigma_{kc})^{0,5}. \quad (12)$$

Действующие продольные напряжения в трубе:

$$\sigma_{nc} = \frac{\nu_c \cdot p_{вн} \cdot D_{вн}}{2 \cdot t_c} \pm \beta \cdot E_c \cdot \Delta T, \quad (13)$$

где  $\beta$  – коэффициент линейного температурного расширения материала трубы,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\Delta T$  – изменение температуры при нагреве (знак «-») или охлаждении (знак «+») трубы,  $^{\circ}\text{C}$ .

Интенсивность линейной относительной деформации трубы:

$$\varepsilon_{nc} = \frac{2 \cdot \sigma_{nc}}{3 \cdot E_c} (1 + 2 \cdot \nu_c). \quad (14)$$

Таким образом, разработана методика определения размеров композитного бандажа для ремонта дефектного участка стального газопровода.

### Расчёт конструктивных размеров стеклопластикового бандажа стального трубопровода с опасным дефектом

По предложенной выше методике проведем расчет конструктивных размеров композитного бандажа для ремонта участка трубопровода с опасным дефектом. Срок эксплуатации трубы 12 лет; материал трубы – сталь 09Г2С; материал композитного бандажа – стеклопластик. Примем следующие исходные данные:

- внутренний диаметр трубы  $D_{вн}=0,978$  м;
- толщина стенки трубы  $t_c=0,021$  м;
- внутреннее рабочее давление в трубе  $p_{вн}=6,0$  МПа;
- коэффициент концентрации напряжений в месте нахождения опасного дефекта  $\alpha=2,3$ ;
- коэффициент, учитывающий конфигурацию опасного дефекта,  $K_d=0,7$ ;
- предел текучести стали 09Г2С  $\sigma_{тс}=345,0$  МПа;
- предел прочности стали 09Г2С  $\sigma_{вс}=620,0$  МПа;
- длина опасного дефекта  $L_d=0,150$  м;
- глубина опасного дефекта  $h_d=0,010$  м;
- длина дефектного участка  $L_d=0,2$  м;
- усилие натяжения при намотке слоя препрега  $P_6=100$  Н/м;
- толщина слоя композитного бандажа  $t_{с\text{л}\text{б}}=0,25 \cdot 10^{-3}$  м;
- модуль упругости Юнга материала композитного бандажа в кольцевом направлении  $E_{к\text{б}}=50,0$  ГПа;
- модуль упругости Юнга стальной трубы  $E_c=206,0$  ГПа;

- коэффициент Пуассона от действия продольных напряжений в кольцевом направлении композитного бандажа  $\nu_{\text{пкб}}=0,28$ ;
  - коэффициент Пуассона от действия кольцевых напряжений в продольном направлении композитного бандажа  $\nu_{\text{кпб}}=0,30$ ;
  - коэффициент Пуассона стальной трубы  $\nu_c=0,30$ ;
  - коэффициент линейного температурного расширения стальной трубы  $\beta=11,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;
  - изменение температуры при охлаждении стальной трубы  $\Delta T=20,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
  - допустимый коэффициент запаса прочности стальной трубы  $[n_{3c}]=1,2$ ;
  - допустимый коэффициент безопасности по давлению  $[m_p]=3,0$ .
- По выражению (4) рассчитаем коэффициент Фолиаса:

$$M_d = \left( 1 + 1,32 \cdot \frac{(0,5 \cdot L_d)^2}{0,5 \cdot D_{\text{вн}} \cdot t_c} \right)^{0,5} = \left( 1 + 1,32 \cdot \frac{(0,5 \cdot 0,15)^2}{0,5 \cdot 0,978 \cdot 0,021} \right)^{0,5} = 1,313.$$

По выражению (3) найдем напряжение течения материала трубы:

$$\sigma_{\text{теч}} = 0,95 \cdot (0,5 \cdot (\sigma_{\text{тс}} + \sigma_{\text{вс}})) = 0,95 \cdot (0,5 \cdot (345,0 \cdot 10^6 + 620,0 \cdot 10^6)) = 458,4 \text{ МПа}.$$

По выражению (2) определим расчетное внутреннее давление разрушения трубы:

$$p_{\text{раз}} = \frac{\sigma_{\text{теч}} \cdot t_c}{0,5 \cdot D_{\text{вн}}} \cdot \left( \frac{t_c - K_d \cdot h_d}{t_c - K_d \cdot h_d \cdot (M_d)^{-1}} \right) =$$

$$= \frac{458,4 \cdot 10^6 \cdot 0,021}{0,5 \cdot 0,978} \cdot \left( \frac{0,021 - 0,7 \cdot 0,01}{0,021 - 0,7 \cdot 0,01 \cdot (1,313)^{-1}} \right) = 17,6 \text{ МПа}.$$

По выражению (1) – коэффициент безопасности по давлению  $m_p$ :

$$m_p = \frac{p_{\text{раз}}}{p_{\text{вн}}} = \frac{17,6 \cdot 10^6}{6,0 \cdot 10^6} = 2,93 \leq [m_p] = 3,0.$$

Так как выполняется условие  $m_p \leq [m_p]$ , то установка композитного бандажа на дефектный участок трубопровода необходима.

По выражению (6) найдем действующие кольцевые напряжения в трубе:

$$\sigma_{\text{кс}} = 0,5 \cdot \alpha \cdot p_{\text{вн}} \cdot \frac{D_{\text{вн}}}{t_c} = 0,5 \cdot 2,3 \cdot 6,0 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,978}{0,021} = 321,3 \text{ МПа}.$$

По выражению (5) – коэффициент запаса прочности стальной трубы  $n_{3c}$ :

$$n_{3c} = \frac{\sigma_{\text{тс}}}{\sigma_{\text{кс}}} = \frac{345,0 \cdot 10^6}{321,3 \cdot 10^6} = 1,074 \leq [n_{3c}] = 1,2.$$

Так как выполняется условие  $n_{3c} \leq [n_{3c}]$ , то установка композитного бандажа на дефектный участок трубопровода необходима.

По выражению (13) рассчитаем действующие продольные напряжения в трубе:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{пс}} &= \frac{\nu_c \cdot p_{\text{вн}} \cdot D_{\text{вн}}}{2 \cdot t_c} + \beta \cdot E_c \cdot \Delta T = \\ &= \frac{0,30 \cdot 6,0 \cdot 10^6 \cdot 0,978}{2 \cdot 0,021} + 11,4 \cdot 10^{-6} \cdot 206,0 \cdot 10^9 \cdot 20 = 88,9 \text{ МПа} \quad .\end{aligned}$$

По выражению (12) определим интенсивность нормальных напряжений в трубе:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{ис}} &= \left( \sigma_{\text{пс}}^2 + \sigma_{\text{кс}}^2 - \sigma_{\text{пс}} \cdot \sigma_{\text{кс}} \right)^{0,5} = \\ &= \left( (88,9 \cdot 10^6)^2 + (321,3 \cdot 10^6)^2 - 88,9 \cdot 10^6 \cdot 321,3 \cdot 10^6 \right)^{0,5} = 287,4 \text{ МПа} \quad .\end{aligned}$$

По выражению (14) найдем интенсивность линейной относительной деформации трубы:

$$\varepsilon_{\text{ис}} = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{ис}}}{3 \cdot E_c} (1 + 2 \cdot \nu_c) = \frac{2 \cdot 287,4 \cdot 10^6 \cdot (1 + 2 \cdot 0,3)}{3 \cdot 206,0 \cdot 10^9} = 1,425 \cdot 10^{-3} \quad .$$

По выражению (11) относительная деформация трубы составляет:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{к}} &= (2 \cdot \sigma_{\text{кс}} - \sigma_{\text{пс}}) \cdot \frac{\varepsilon_{\text{ис}}}{2 \cdot \sigma_{\text{ис}}} + \frac{1 - 2 \cdot \nu_c}{E_c} \cdot \frac{\sigma_{\text{пс}} + \sigma_{\text{кс}}}{3} = (2 \cdot 321,3 \cdot 10^6 - 88,9 \cdot 10^6) \cdot \frac{1,425 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 287,4 \cdot 10^6} + \\ &+ \frac{1 - 2 \cdot 0,3}{206,0 \cdot 10^9} \cdot \frac{88,9 \cdot 10^6 + 321,3 \cdot 10^6}{3} = 1,7 \cdot 10^{-3} \quad .\end{aligned}$$

По выражению (10) рассчитаем действующие кольцевые напряжения в композитном бандаже:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{кб}} &= \left( \varepsilon_{\text{к}} + (\sigma_{\text{пс}} - \nu_c \cdot \sigma_{\text{кс}}) \cdot \frac{\nu_{\text{пкб}}}{E_c} \right) \cdot \frac{E_{\text{кб}}}{1 - \nu_{\text{пкб}} \cdot \nu_{\text{кпб}}} = \\ &= \left( 1,7 \cdot 10^{-3} + (88,9 \cdot 10^6 - 0,3 \cdot 321,3 \cdot 10^6) \cdot \frac{0,28}{206,0 \cdot 10^9} \right) \cdot \frac{50,0 \cdot 10^9}{1 - 0,28 \cdot 0,3} = 92,2 \text{ МПа} \quad .\end{aligned}$$

Число слоев композитного бандажера определим по выражению (9):

$$\begin{aligned}n_{\text{б}} &= 0,5 \cdot p_{\text{вн}} \cdot D_{\text{вн}} \cdot \frac{\alpha - 1}{\sigma_{\text{кб}} \cdot t_{\text{слб}} - P_{\text{б}}} = \\ &= 0,5 \cdot 6,0 \cdot 10^6 \cdot 0,978 \cdot \frac{2,3 - 1}{92,2 \cdot 10^6 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} - 100} = 166,2 \approx 167 \text{ шт.}\end{aligned}$$

Толщину стенки композитного бандажера найдем по выражению (8):

$$t_{\text{б}} = n_{\text{б}} \cdot t_{\text{слб}} = 167 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = 41,6 \cdot 10^{-3} \approx 42 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Длина композитного бандажа по выражению (7):

$$L_6 = L_{\text{уч}} + D_{\text{вн}} + 2 \cdot t_c = 0,2 + 0,978 + 2 \cdot 0,021 = 1,22\text{м.}$$

Таким образом, по предложенной методике рассчитаны конструктивные размеры стеклопластикового бандажа для ремонта дефектной трубы из стали 09Г2С.

### Заключение

По проведенному исследованию можно сделать следующие выводы:

1. Разработана методика определения размеров композитного бандажа (длина  $L_6$ ; толщина стенки  $t_6$ ; число слоев  $n_6$ ) для ремонта дефектного участка трубопровода, учитывающая его размеры, величину внутреннего рабочего давления в нем, а также размеры опасного дефекта. В методике приведены условия  $m_p \leq [m_p]$  или  $n_{zc} \leq [n_{zc}]$ , при выполнении одного из них необходима установка композитного бандажа. На дефектном участке трубопровода композитный бандаж формируют послойной намоткой препрега с последующим отверждением связующего.

2. На примере расчета конструктивных размеров стеклопластикового бандажа для ремонта дефектной трубы из стали 09Г2С показана практическая значимость предложенной методики.

Целью исследования достигнута – разработана методика расчета конструктивных размеров композитного бандажа для усиления потенциально опасного участка трубопровода и обеспечения его безопасности.

### Список источников

1. Черноиванов В.И., Голубев И.Г. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы). М.: ФГНУ «Росинформатех», 2010. 376 с.
2. Ли Р.И. Применение полимерных материалов в подшипниковых узлах при изготовлении и ремонте машин: монография. Мичуринск: Изд-во МичГАУ, 2010. 160 с.
3. Андрияшкин А.Ю., Михеенков М.Ю., Афанасьев Е.О. Восстановление деталей техники специального назначения с помощью композиционных материалов и их последующей механической обработкой // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 3-4 (105–106). С. 59–64.
4. Андрияшкин А.Ю., Михеенков М.Ю., Галинская О.О. Восстановление деталей техники специального назначения с помощью композиционных материалов и специальной оснастки // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 5–6 (107–108). С. 51–58.
5. Анализ возможностей ремонта технологических трубопроводов компрессорных станций / И.И. Велиюлин [и др.] // Газовая промышленность. 2022. № 8 (836). С. 60–65.
6. Велиюлин И.И., Митрохин М.Ю., Александров В.А. К вопросу о возможности длительного упрочнения труб с поверхностными дефектами с использованием упрочняющих муфт // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2024. № 4 (142). С. 70–73.
7. Виноградов П.В., Мазитова А.А. Оценка критериев определения взаимодействия коррозионных дефектов в трубопроводе // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. № 1 (141). С. 139–150.
8. Исследование напряженного состояния механически неоднородных сварных соединений магистральных трубопроводов с поверхностным трещиноподобным дефектом / Е.А. Тигулев [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2021. № 5. С. 122–126.
9. Тигулев Е.А., Кантемиров И.Ф. Оценка прочности механически неоднородных сварных соединений магистральных трубопроводов с поверхностным трещиноподобным

дефектом // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. № 5 (133). С. 79–88.

10. Сильвестров С.А., Кантемиров И.Ф., Булкин В.А. Уравнения состояния трубопровода с учетом конфигурации и комплекса воздействий // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2019. № 4. С. 31–38.

11. Рыжков Д.С., Татьянников Д.А. Актуальность применения композитных материалов при усилении несущих конструкций // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2020. № 2. С. 54–60.

12. Оценка эффективности композитных бандажей для восстановления дефектных участков трубопроводов / Э.Ф. Гарф [и др.] // Автоматическая сварка. 2011. № 7 (699). С. 44–49.

13. Эффективность применения композитных полимерных бандажей при строительстве и ремонте трубопроводов / Е.А. Лобова [и др.] // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2018. № 1. С. 30–36.

14. Восстановление работоспособности дефектных труб с помощью упрочняющих конструкций / А.А. Филатов [и др.] // Территория «Нефтегаз». 2018. № 7-8. С. 36–40.

15. Расчет напряженно-деформированного состояния трубопровода, усиленного бандажом / Р.А. Рамазанов [и др.] // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. № 1 (135). С. 78–88.

16. Анализ дефектов технологических трубопроводов и методов их ремонта / Р.А. Рамазанов [и др.] // Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20. № 2. С. 78–85.

17. Сергеев А.Ю., Баурова Н.И. Исследование длительной прочности ремонтных бандажей из композитных колец однонаправленной структуры // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 10. С. 28–33.

## References

1. Chernoiivanov V.I., Golubev I.G. Vosstanovlenie detalej mashin (Sostoyanie i perspektivy). M.: FGNU «Rosinformagrotekh», 2010. 376 s.

2. Li R.I. Primenenie polimernyh materialov v podshipnikovyyh uzlah pri izgotovlenii i remonte mashin: monografiya. Michurinsk: Izd-vo MichGAU, 2010. 160 s.

3. Andryushkin A.Yu., Miheenkov M.Yu., Afanas'ev E.O. Vosstanovlenie detalej tekhniki special'nogo naznacheniya s pomoshch'yu kompozitsionnykh materialov i ih posleduyushchey mekhanicheskoy obrabotkoy // Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16: Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. 2017. № 3-4 (105–106). S. 59–64.

4. Andryushkin A.Yu., Miheenkov M.Yu., Galinskaya O.O. Vosstanovlenie detalej tekhniki special'nogo naznacheniya s pomoshch'yu kompozitsionnykh materialov i special'noj osnastki // Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16: Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. 2017. № 5–6 (107–108). S. 51–58.

5. Analiz vozmozhnostej remonta tekhnologicheskikh truboprovodov kompressornykh stancij / I.I. Veliyulin [i dr.] // Gazovaya promyshlennost'. 2022. № 8 (836). S. 60–65.

6. Veliyulin I.I., Mitrohin M.Yu., Aleksandrov V.A. K voprosu o vozmozhnosti dlitel'nogo uprochneniya trub s poverhnostnymi defektami s ispol'zovaniem uprochnyayushchih muft // Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa. 2024. № 4 (142). S. 70–73.

7. Vinogradov P.V., Mazitova A.A. Ocenka kriteriev opredeleniya vzaimodejstviya korrozionnykh defektov v truboprovode // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov. 2023. № 1 (141). S. 139–150.

8. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya mekhanicheski neodnorodnykh svarnykh soedinenij magistral'nykh truboprovodov s poverhnostnym treshchinopodobnym defektom / E.A. Tigulev [i dr.] // Neftyanoe hozyajstvo. 2021. № 5. S. 122–126.

9. Tigulev E.A., Kantemirov I.F. Ocenka prochnosti mekhanicheski neodnorodnykh svarnykh soedinenij magistral'nykh truboprovodov s poverhnostnym treshchinopodobnym defektom // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov. 2021. № 5 (133). S. 79–88.

10. Sil'vestrov S.A., Kantemirov I.F., Bulkin V.A. Uravneniya sostoyaniya truboprovoda s uchetom konfiguracii i kompleksa vozdeystvij // *Transport i hranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya*. 2019. № 4. S. 31–38.
11. Ryzhkov D.S., Tat'yannikov D.A. Aktual'nost' primeneniya kompozitnyh materialov pri usilenii nesushchih konstrukcij // *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2020. № 2. S. 54–60.
12. Ocenka effektivnosti kompozitnyh bandazhej dlya vosstanovleniya defektnyh uchastkov truboprovodov / E.F. Garf [i dr.] // *Avtomaticeskaya svarka*. 2011. № 7 (699). S. 44–49.
13. Effektivnost' primeneniya kompozitnyh polimernyh bandazhej pri stroitel'stve i remonte truboprovodov / E.A. Lobova [i dr.] // *Transport i hranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya*. 2018. № 1. S. 30–36.
14. Vosstanovlenie rabotosposobnosti defektnyh trub s pomoshch'yu uprochnyayushchih konstrukcij / A.A. Filatov [i dr.] // *Territoriya «Neftegaz»*. 2018. № 7-8. S. 36–40.
15. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya truboprovoda, usilennogo bandazhom / R.A. Ramazanov [i dr.] // *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov*. 2022. № 1 (135). S. 78–88.
16. Analiz defektov tekhnologicheskikh truboprovodov i metodov ih remonta / R.A. Ramazanov [i dr.] // *Neftegazovoe delo*. 2022. T. 20. № 2. S. 78–85.
17. Sergeev A.Yu., Baurova N.I. Issledovanie dlitel'noj prochnosti remontnyh bandazhej iz kompozitnyh kolec odnonapravlennoj struktury // *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2015. № 10. S. 28–33.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 03.10.2025; одобрена после рецензирования: 18.11.2025; принята к публикации: 24.02.2026

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 03.10.2025; approved after review: 18.11.2025; accepted for publication: 24.02.2026

*Информация об авторах:*

**Андрюшкин Александр Юрьевич**, заведующий кафедрой А2 «Технологии конструкционных материалов и производства ракетно-космической техники» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1), доцент, кандидат технических наук, e-mail: Sascha1a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7812-069X>, SPIN-код: 7905-9345

**Булыгин Владимир Вячеславович**, аспирант Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова кафедры А2 «Технологии конструкционных материалов и производства ракетно-космической техники» (190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1), e-mail: skaevod3000@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-1929-1437>

**Кадочникова Елена Николаевна**, старший научный сотрудник 26 отдела научно-исследовательского Научно-исследовательского института (военно-системных исследований материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации) Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева (191123, Санкт-Петербург, Воскресенская наб., д. 10 А), доцент, кандидат технических наук, e-mail: vf10@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4577-390X>, SPIN-код: 9778-4011

*Information about the authors:*

**Andryushkin Alexander Yu.**, head of the A2 department «Technologies of structural materials and production of rocket and space technology» of the D.F. Ustinov Baltic state technical university «VOENMEH» (190005, Saint-Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya str., 1), associate professor, candidate of technical sciences, e-mail: Sascha1a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7812-069X>, SPIN: 7905-9345

**Bulygin Vladimir V.**, postgraduate student of the department of A2 «Technologies of structural materials and production of rocket and space technology» at the Baltic state technical university «VOENMEH» named after D.F. Ustinov (190005, Saint-Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya str., 1), e-mail: skaevod3000@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-1929-1437>

**Kadochnikova Elena N.**, senior researcher of 26 department of scientific research at the Research institute (military system research of logistics of the Armed Forces of the Russian Federation) of Military academy of logistics named after general of the army A.V. Khrulev (191123, Saint-Petersburg, Voskresenskaya emb., 10 A), associate professor, candidate of technical sciences, e-mail: vf10@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4577-390X>, SPIN: 9778-4011