

На правах рукописи

**ШУСТОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ**

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ БЕСТРАНШЕЙНОЙ  
РЕКОНСТРУКЦИИ ТРУБОПРОВОДА БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**

Специальность 25.00.19 - Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень 2005

Работа выполнена в Тюменском государственном нефтегазовом университете

Научный руководитель      доктор технических наук, профессор,  
Заслуженный деятель науки и техники РФ  
**Кушнир Семен Яковлевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Тарасенко Александр Алексеевич**

кандидат технических наук  
**Жевагин Алексей Иванович**

Ведущая организация: Государственное унитарное предприятие  
«Институт проблем транспорта  
энергоресурсов» (ГУП «ИПТЭР»), г.Уфа

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 2005г. в \_\_\_\_\_ час.  
на заседании диссертационного совета Д 212.273.02 при  
Тюменском государственном нефтегазовом университете  
по адресу: 625000, г.Тюмень, ул.Володарского, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТюмГНГУ  
по адресу 625039, г.Тюмень, ул.Мельникайте, 72.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2005г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

Челомбитко С.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Трубопроводы различного диаметра и назначения являются важнейшей составляющей любой трубопроводной системы. Длительная их эксплуатация приводит к увеличению числа отказов различного вида, что требует разработки новых и совершенствования существующих методов ремонта.

Один из вариантов реконструкции подземного трубопровода может быть реализован путем приформовки стеклопластика на внутреннюю поверхность трубы. Хорошие перспективы этот способ имеет для трубопроводов большого диаметра и глубокого заложения (например, для питающих водоводов теплоэлектростанций). Это связано с тем обстоятельством, что вскрытие трубопровода традиционным методом связано с большим объемом земляных работ, а иногда просто не осуществимо вследствие наличия развитой инфраструктуры (инженерно-коммуникационные сети, постройки различного назначения и т.д.).

Предлагаемый способ реконструкции трубопровода обеспечивает существенное увеличение его остаточного ресурса, что и определяет актуальность выполненных исследований.

**Целью диссертации является** совершенствование метода расчета напряженно-деформированного состояния стеклопластиковой оболочки, используемой при бестраншейной реконструкции трубопровода и определение его остаточного ресурса (по металлу) после ремонта.

Для выполнения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие **задачи:**

- исследовать силовое взаимодействие трубопровода большого диаметра с окружающим грунтом с учетом статических и динамических нагрузок;

- определить внутренние силовые факторы (продольную и поперечную силы, изгибающий момент) в стенке стеклопластикового трубопровода;

- выявить влияние отпора грунта и конечной жесткости стенки стеклопластикового трубопровода на величины внутренних факторов;

- определить необходимую толщину стенки стеклопластикового трубопровода на основе расчета его напряженно-деформированного состояния;

- выполнить расчет напряженно-деформированного состояния бинарной оболочки «металл - стеклопластик» и оценить остаточный ресурс (по металлу) трубопровода после его реконструкции.

#### **Научная новизна выполненных исследований**

- предложена расчетная схема силового взаимодействия трубопровода большого диаметра с грунтом с учетом его упругого отпора;

- получен критерий деформативности стенки трубопровода большого диаметра, учитывающий упругий отпор окружающего грунта;

- предложена методика оценки остаточного ресурса (по металлу) трубопровода большого диаметра после его реконструкции.

#### **Практическая ценность работы**

Сформулированы требования к физико-механическим характеристикам стеклопластиков, используемых при бестраншейной реконструкции трубопроводов большого диаметра, что определяет стратегию и технологию выполнения ремонтно-восстановительных работ.

#### **На защиту выносятся:**

- 1) разработанная модель силового взаимодействия стеклопластиковой оболочки с окружающим грунтом;

- 2) методика определения толщины стеклопластиковой оболочки с учетом всех силовых, температурных и химических факторов;

3) расчет остаточного ресурса (по металлу) трубопровода после его реконструкции.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены на: юбилейной научно-практической конференции по перспективам развития нефтегазовых объектов Западной Сибири г.Тюмень, ТГНГУ, 2003г.; на региональной научно-практической конференции по проблемам эксплуатации транспортных систем в суровых условиях г.Тюмень, ТГНГУ, 2003г.; на региональной научно-практической конференции ТГНГУ, 2004г.; на международной научно-технической конференции «Интерстроймех - 2005», г.Тюмень, ТГНГУ, 2005г.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 5 статей.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4-х разделов, общих выводов и списка литературы. Диссертация изложена на 132 стр., содержит 32 рисунка и 18 таблиц. Список литературы включает 138 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснованы актуальность диссертационной работы, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая ценность результатов исследований.

**В первом разделе** приведен анализ современного состояния проблемы силового взаимодействия трубопроводов с грунтом и методов расчета напряженно-деформированного состояния тонкостенных анизотропных конструкций.

Вопросы силового воздействия на трубопроводы изучались Н.А.Цитовичем, П.П.Бородавкиным, Г.К.Клейном, О.Е.Бугаевой,

С.А.Ивановым, В.М.Лисовым, А.М.Новиковым, В.С.Эристовым, Г.А.Тартаковским, А.Б.Айбиндером и др.

Изучением напряжений в криволинейных стержнях с учетом анизотропных свойств их материалов занимались В.В.Антонов, В.В.Бейлин, А.В.Крайнов, В.П.Павелко, С.А.Амбарцумян, Ю.Е.Якубовский и др.

Развитию процесса механохимической коррозии в металлоконструкциях посвящены работы Э.М.Гутмана, Р.С.Зайнуллина, Р.А.Зарипова, А.Г.Гумерова, М.М.Велиева и др.

Автором выполнен обзор расчетных схем силового взаимодействия подземного трубопровода с учетом упругого отпора грунта. Поскольку речь идет о бинарной конструкции «металл-стеклопластик», то в работе приведены методы определения прочностных характеристик указанных материалов.

На основании изложенного определены основные направления исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Во втором разделе** рассматривается силовое взаимодействие стеклопластикового трубопровода с окружающим грунтом после полного разрушения (вследствие коррозии) металлической стенки первоначально проложенного трубопровода (рис.1).

Толщина стеклопластиковой оболочки должна быть выбрана таким образом, чтобы она могла выдерживать статические и динамические нагрузки, ранее воспринимавшихся металлическим трубопроводом при следующих вариантах загрузки:

1-ый вариант: статическое (вертикальное и боковое) давление грунта + динамическое воздействие от возможного проезда автотранспорта;

2-ой вариант: 1-ый вариант + собственный вес трубопровода с перекачиваемой жидкостью с интенсивностью  $P_{соб}$ ;

3-ий вариант: 2-ой вариант + рабочее давление жидкости  $p_{ж}$  ;

4-ый вариант: 1-ый вариант + частичное вакуумирование трубопровода при давлении внутреннего воздуха  $p_{вн}$  .

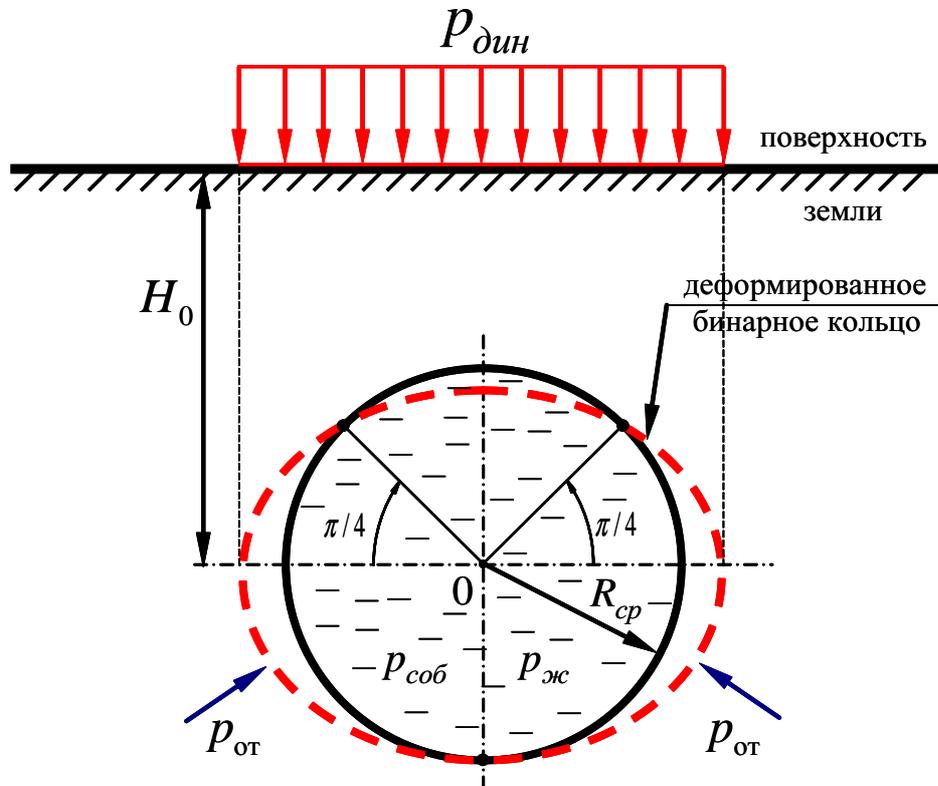


Рис.1. Силовое нагружение подземного стеклопластикового трубопровода

Средние значения вертикального и бокового давлений грунта находились по следующим формулам:

$$p = \gamma \left( H_0 - \frac{\pi}{4} R_{ср} \right); \quad q = K_0 \gamma H_0. \quad (1)$$

где  $\gamma$  - удельный вес грунта;

$H_0$  - глубина заложения трубопровода;

$R_{ср}$  - срединный радиус оболочки;

$K_0$  - коэффициент бокового давления грунта.

Среднее динамическое давление от проезда автотранспорта определялось по СНиП 2.02.01-83 «Основания зданий и сооружений»:

$$\bar{p}_{\text{дин}} = \alpha p_{\text{дин}} \quad (2)$$

( $\alpha$  - коэффициент ослабления поверхностного давления  $p_{\text{дин}}$  на глубине  $H_0$ , определяемый по таблице 1 приложения 2 указанного СНиПа).

При расчете трубопроводов большого диаметра должна учитываться их деформативность, что приводит к появлению упругого отпора грунта с интенсивностью  $p_{\text{от}}$ , зависящей от коэффициента постели  $k$  и величины радиального перемещения  $u$  участка трубопровода:

$$p_{\text{от}} = ku. \quad (3)$$

Упругий отпор грунта перераспределяет вертикальную нагрузку и вызывает различие давлений  $p_v$  и  $p_n$ , действующих на верхнюю и нижнюю часть трубопровода.

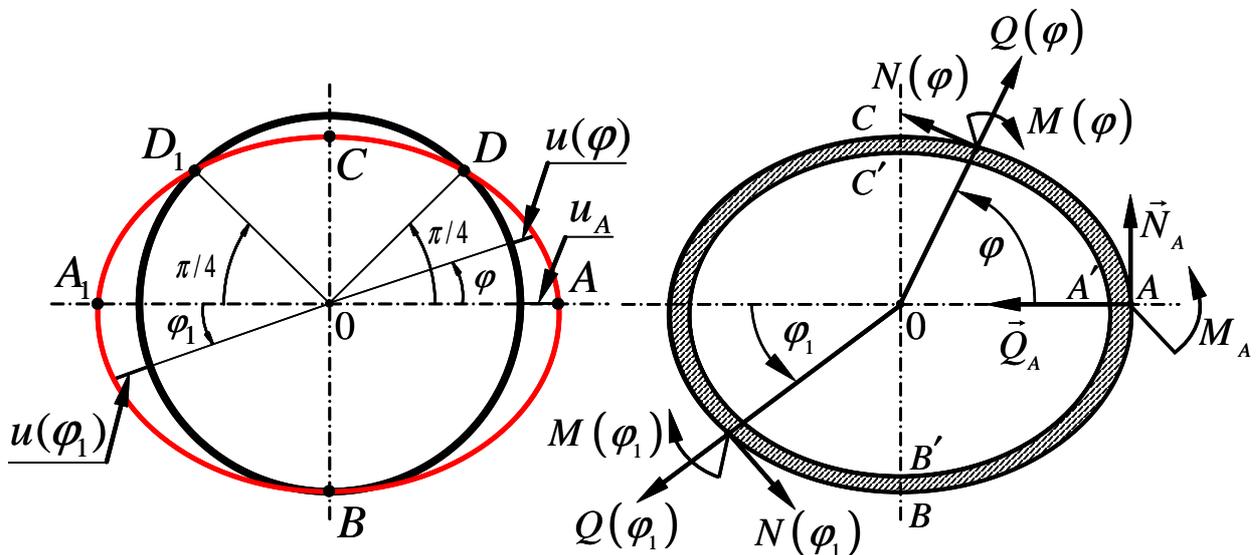


Рис.2. Деформированное состояние стеклопластиковой оболочки

Рис.3. К расчету внутренних силовых факторов оболочки

Деформированное состояние стеклопластикового трубопровода, в поперечном сечении представляющее собой замкнутое кольцо, показано на рис.2.

Смещенное положение упругой линии кольца характеризуется указанным (3) радиальным перемещением  $u$ , угловое распределение которого в диссертации аппроксимировано следующими уравнениями:

$$\begin{cases} u(\varphi) = u_A \cos 2\varphi, & 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4}; \quad \frac{3\pi}{4} \leq \varphi \leq \pi; \\ u(\varphi_1) = \frac{1}{8} u_A (3 + 4 \cos 2\varphi_1 + \cos 4\varphi_1), & 0 \leq \varphi_1 \leq \pi, \end{cases} \quad (4)$$

при этом упругий отпор грунта соответствует дуге  $DABA_1D_1$ .

Первое из уравнений системы (4) соответствует подходу О.Е.Бугаевой, а выбор второго опирается на следующие рассуждения:

1. Радиальное перемещение точки  $B$  может быть принято равным нулю, поскольку:

- первоначальная укладка металлического трубопровода проводится на грунт ненарушенной структуры;
- многолетняя эксплуатация металлического трубопровода приводит к дополнительному уплотнению грунта в зоне нижней образующей трубы;
- грунт обратной засыпки имеет модуль деформации меньший, чем грунт основания.

2. На границах сопряжения верхней и нижней части кольца ( $\varphi = 0, \varphi_1 = \pi$  и  $\varphi = \pi, \varphi_1 = 0$ ) должны быть равны радиальные перемещения, углы поворота и изгибающие моменты, определяемые известным уравнением Буссинеска:

$$\frac{d^2 u}{d\varphi^2} + u = \frac{M(\varphi) R_{cp}^2}{EI}; \quad \frac{d^2 u}{d\varphi_1^2} + u = \frac{M(\varphi_1) R_{cp}^2}{EI}. \quad (5)$$

( $EI$  - изгибная жесткость кольца).

Для расчета напряженно-деформированного кольца должны быть определены его внутренние силовые факторы: продольная сила  $N$ , поперечная сила  $Q$  и изгибающий момент  $M$  (рис.3). С этой целью выполнен мысленный разрез кольца в сечении  $A - A'$  и действие нижней части кольца на верхнюю в этом сечении заменено реакциями  $N_A, Q_A$  и  $M_A$ , что позволило найти выражения для внутренних факторов через значения углов  $\varphi$  и  $\varphi_1$ .

Наличие вертикальной оси симметрии грузовой эпюры дает возможность получить выражения для величины  $N_A$  при рассматриваемых вариантах загрузки:

$$N_A = \begin{cases} N_A^{(1)} = -lR_{cp} (p + \bar{p}_{дин}), & \text{1-ый вариант;} \\ N_A^{(2)} = -lR_{cp} (p + \bar{p}_{дин} + p_{cob}), & \text{2-ой вариант;} \\ N_A^{(3)} = lR_{cp} (p_{жс} - p - \bar{p}_{дин} - p_{cob}), & \text{3-ий вариант;} \\ N_A^{(4)} = -lR_{cp} (p + \bar{p}_{дин} + \Delta p), & \text{4-ый вариант,} \end{cases} \quad (6)$$

где  $\Delta p = p_{атм} - p_{вн}$  - разность атмосферного давления и давления воздуха при частичном вакуумировании.

Из полученных в диссертации выражений для продольной силы  $N$  при  $\varphi = \pi$  и  $\varphi_1 = \pi$  следуют следующие соотношения для давлений  $p_в$  и  $p_н$

$$lR_{cp} p_в + \frac{(\sqrt{2}-1)}{3} lR_{cp} k u_A = N_A; \quad lR_{cp} p_н + \frac{1}{5} lR_{cp} k u_A = N_A. \quad (7)$$

Для нахождения пяти неизвестных величин  $p_в, p_н, u_A, Q_A$  и  $M_A$  к двум уравнениям системы (7) добавляются три уравнения, полученные из соотношений (4) и (5) для углов  $\varphi = 0, \varphi = \frac{\pi}{4}$  и  $\varphi_1 = \frac{\pi}{2}$ :

$$3u_A = \frac{M_A R_{cp}^2}{EI}; \quad 0 = M \left( \varphi = \frac{\pi}{4} \right) = M \left( \varphi_1 = \frac{\pi}{2} \right), \quad (8)$$

Иначе говоря, раскрытие статической неопределенности плоской кольцевой системы проведено в работе с помощью уравнения Буссинеска, что позволило получить следующие значения искомых величин:

$$Q_A = \begin{cases} Q_A^{(1)} = \frac{-0,146lR_{cp}^2 (p + \bar{p}_{дин} - q - K_0 \bar{p}_{дин})}{1 + 0,105 D}; \\ Q_A^{(2)} = \frac{-0,146lR_{cp}^2 [p + \bar{p}_{дин} + p_{соб} - q - K_0 (\bar{p}_{дин} + p_{соб})]}{1 + 0,105 D}; \\ Q_A^{(3)} = Q_A^{(2)}; \\ Q_A^{(4)} = Q_A^{(1)}; \end{cases} \quad (9)$$

$$M_A = \begin{cases} M_A^{(1)} = \frac{-0,354lR_{cp}^2 (p + \bar{p}_{дин} - q - K_0 \bar{p}_{дин})}{1 + 0,105 D}; \\ M_A^{(2)} = \frac{-0,354lR_{cp}^2 [p + \bar{p}_{дин} + p_{соб} - q - K_0 (\bar{p}_{дин} + p_{соб})]}{1 + 0,105 D}; \\ M_A^{(3)} = M_A^{(2)}; \\ M_A^{(4)} = M_A^{(1)}; \end{cases} \quad (10)$$

где  $D = \frac{lR_{cp}^4 k}{EI}$  - безразмерный параметр, являющийся критерием деформативности кольца.

Перемещение  $u_A^i$  точки  $A$  для варианта загрузки с номером  $i$  вычисляется по первой формуле (8):

$$u_A^i = -\frac{M_A^i R_{cp}^2}{3EI}, \quad (i = 1 \div 4). \quad (11)$$

По найденным значениям неизвестных величин могут быть найдены внутренние факторы в любом сечении кольца. В частности, для характерных сечений  $B - B'$  и  $C - C'$  эти факторы рассчитываются по следующим формулам:

Сечение  $B - B'$ 

$$N_B = \begin{cases} N_B^{(1)} = -lR_{cp} (q + K_0 \bar{p}_{дин}) - \frac{8}{15} lR_{cp} ku_A^{(1)} + Q_A^{(1)}; \\ N_B^{(2)} = -lR_{cp} [q + K_0 (\bar{p}_{дин} + p_{cob})] - \frac{8}{15} lR_{cp} ku_A^{(2)} + Q_A^{(2)}; \\ N_B^{(3)} = lR_{cp} [p_{жс} - q - K_0 (\bar{p}_{дин} + p_{cob})] - \frac{8}{15} lR_{cp} ku_A^{(3)} + Q_A^{(3)}; \\ N_B^{(4)} = -lR_{cp} [\Delta p + q + K_0 (\bar{p}_{дин} + p_{cob})] - \frac{8}{15} lR_{cp} ku_A^{(4)} + Q_A^{(4)}, \\ Q_B^{(i)} = 0; \quad M_B^{(i)} = 0; \quad (i = 1 \div 4) \end{cases} \quad (12)$$

Сечение  $C - C'$ 

$$N_C = \begin{cases} N_C^{(1)} = -lR_{cp} (q + K_0 \bar{p}_{дин}) - \frac{\sqrt{2}}{3} lR_{cp} ku_A^{(1)} - Q_A^{(1)}; \\ N_C^{(2)} = -lR_{cp} [q + K_0 (\bar{p}_{дин} + p_{cob})] - \frac{\sqrt{2}}{3} lR_{cp} ku_A^{(2)} - Q_A^{(2)}; \\ N_C^{(3)} = lR_{cp} [p_{жс} - q - K_0 (\bar{p}_{дин} + p_{cob})] - \frac{\sqrt{2}}{3} lR_{cp} ku_A^{(3)} - Q_A^{(3)}; \\ N_C^{(4)} = -lR_{cp} [\Delta p + q + K_0 (\bar{p}_{дин} + p_{cob})] - \frac{\sqrt{2}}{3} lR_{cp} ku_A^{(4)} - Q_A^{(4)}, \\ Q_C^{(i)} = 0; \quad M_C^{(i)} = -M_A^{(i)}; \quad (i = 1 \div 4) \end{cases} \quad (13)$$

**В третьем разделе** рассматривается напряженное состояние стенки стеклопластикового трубопровода (рис.4).

При расчетах напряженного состояния стеклопластиковой оболочки должно учитываться различие модулей напряжения  $E_+$  и сжатия  $E_-$ . Это различие приводит к смещению положения нейтрального слоя кольца (рис.4.1).

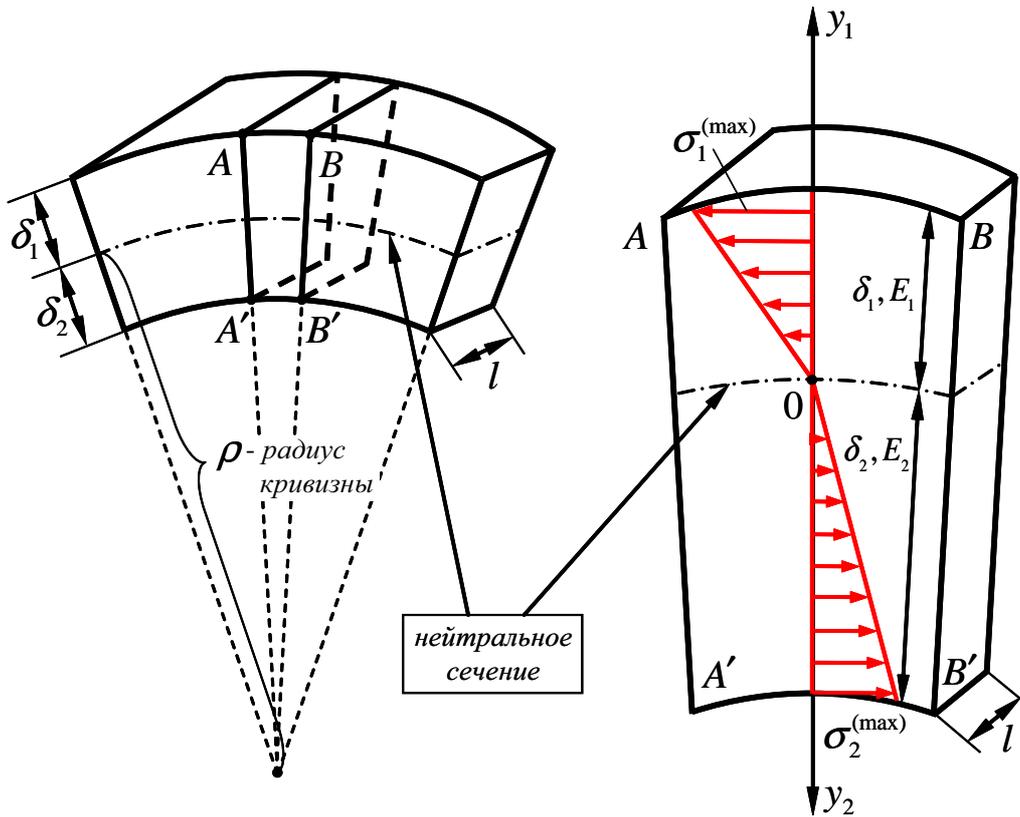


Рис. 4. Изгиб кольца в главной плоскости

Размеры зон с одинаковым видом деформации рассчитываются следующим образом:

$$\delta_1 = \delta \frac{1}{1 + \sqrt{m}}; \quad \delta_2 = \delta \frac{\sqrt{m}}{1 + \sqrt{m}}, \quad (12)$$

где  $\delta = \delta_1 + \delta_2$  - толщина стенки;

$$m = \frac{E_1}{E_2} - \text{безразмерный параметр.}$$

Максимальные (по модулю) напряжения в стенке, вызванные изгибающим моментом  $M$ , вычисляются по следующим формулам:

$$\sigma_{1,M}^{(\max)} = \frac{3M(1 + \sqrt{m})}{l\delta^2}; \quad \sigma_{2,M}^{(\max)} = \frac{3M(1 + \sqrt{m})}{l\delta^2\sqrt{m}}. \quad (13)$$

Поскольку кольцо наряду с изгибом подвергается растяжению или сжатию, то экстремальные напряжения в нем рассчитываются при

следующих сочетаниях внутренних факторов  $N$  и  $M$  для произвольного сечения кольца:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{N,M}^{(\max)} = \pm \frac{N}{l\delta} + \sigma_{1,M}^{(\max)} \\ \sigma_{N,M}^{(\max)} = \pm \frac{N}{l\delta} + \sigma_{2,M}^{(\max)}. \end{array} \right. \quad \text{или} \quad (14)$$

Так как доведение теоретических исследований до численных результатов требует конкретных значений физико-механических характеристик стеклопластиковой оболочки, то под руководством автора были проведены лабораторные испытания модельного стеклопластика, в результате чего были получены следующие экспериментальные данные:

$$\begin{aligned} E_+ &= (1,99 \pm 0,16) \cdot 10^4 \text{ МПа} && \text{– модуль упругости} \\ &&& \text{стеклопластика при сжатии;} \\ E_- &= (1,40 \pm 0,08) \cdot 10^4 \text{ МПа} && \text{– модуль упругости} \\ &&& \text{стеклопластика при растяжении;} \\ R_+ &= (124 \pm 10,1) \text{ МПа} && \text{– предел прочности} \\ &&& \text{стеклопластика при растяжении;} \\ R_- &= (94 \pm 7,2) \text{ МПа} && \text{– предел прочности} \\ &&& \text{стеклопластика при сжатии.} \end{aligned} \quad (15)$$

Значения модулей упругости и прочностных показателей стеклопластика, полученные в результате кратковременных испытаний, должны быть пересчитаны на соответствующие длительные значения этих параметров.

Отечественный и зарубежный опыт продолжительной эксплуатации стеклопластиковых труб показывает, что эти значения могут быть взяты на уровне 30% для прочностных показателей и на уровне 60% для модулей деформации:

$$\begin{aligned} E_+^{(p)} &= 0,6E_+ = 1,19 \cdot 10^4 \text{ МПа}; & E_-^{(p)} &= 0,6E_- = 0,84 \cdot 10^4 \text{ МПа}; \\ R_+^{(p)} &= 0,3E_+ = 37,2 \text{ МПа}; & R_-^{(p)} &= 0,3E_- = 28,2 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (16)$$

Одной из основных задач, возникающих при указанном способе реконструкции, является определение необходимой толщины стеклопластиковой оболочки, обеспечивающей безопасную эксплуатацию трубопровода. Для этого должны быть определены опасные сечения кольцевой оболочки, в которых результирующие напряжения, определяемые системой (14), имеют экстремальные значения.

Таким сечением оказалось сечение  $A - A'$  при третьем варианте загрузки трубопровода и при первом сочетании внутренних силовых факторов  $N_A$  и  $M_A$  в системе (14). Неравенство для определения толщины  $\delta$  стеклопластиковой оболочки для этого случая имеет следующий вид:

$$\frac{N_A^{(3)}}{l\delta} + \frac{3M_A^{(3)}(1 + \sqrt{m})}{l\delta^2} \leq R_+^{(p)}. \quad (17)$$

Толщина  $\delta$  явным образом выходит в знаменатели левых частей неравенства (17) и неявным образом в изгибающий момент  $M_A$  (система 10) через изгибную жесткость  $EI$ :

$$EI = \frac{1}{12} \delta^3 l E \quad (18)$$

(модуль упругости стеклопластика при изгибе  $E$  экспериментально не определялся и в расчетах принимался равным  $E = 0,5(E_+^{(p)} + E_-^{(p)})$ ).

Конкретные расчеты в диссертации были выполнены для проводимой в настоящее время реконструкции циркуляционного трубопровода ТЭЦ-1 (г.Тюмень) при следующих значениях расчетных параметров:

$$\begin{aligned} H_0 &= 6,5 \text{ м (район водозабора); } R_{cp} = 0,98 \text{ м; } l = 1 \text{ м; } \gamma_{cp} = 1,90 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3; \\ K_0 &= 0,54; K = 3,78 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^3; p = 10,9 \cdot 10^4 \text{ Па; } q = 6,67 \cdot 10^4 \text{ Па; } m = 1,42; \\ E_{cp} &= 5 \text{ МПа (модуль деформации грунта); } p_{жс} = 0,5 \text{ МПа;} \\ V_{cp} &= 0,35 \text{ (коэффициент Пуассона грунта); } p_{cob} = 0,82 \cdot 10^4 \text{ Па;} \\ \bar{p}_{дин} &= 4 \cdot 10^4 \text{ Па; } P_{noz} = 3,21 \cdot 10^4 \text{ Н/м; } p_{вн} = 0,05 \text{ МПа; } E = 1,02 \cdot 10^4 \text{ МПа.} \end{aligned} \quad (19)$$

Решением неравенства (17) является значение  $\delta \geq 10,7$  мм (с учетом особенностей технологии нанесения стеклопластикового покрытия принято значение  $\delta = 12$  мм).

Для полученного значения толщины стеклопластиковой оболочки  $\delta = 12$  мм выполнены прочностные расчеты, показавшие, что эта толщина проходит при всех вариантах загрузки и сочетаниях внутренних факторов и для сечений  $B - B'$  и  $C - C'$ .

В разделе отдельно рассматривается вопрос об устойчивости формы кольца, которая может быть потеряна при 4-ом варианте загрузки оболочки. Критическое внешнее равномерное обжимающее давление  $p_{кр}$ , вызывающее это явление, рассчитывается (с учетом упругого отпора грунта) по формуле Николаи:

$$p_{кр} = p_1 \frac{n^2 - 1}{3} + 2p_2 \frac{3}{n^2 - 1}, \quad (20)$$

где  $p_1 = \frac{3EI}{R_{cp}^3}$  и  $p_2 = \frac{E_{gp}}{6(1 + \nu_{gp})}$  - параметры, определяемые

геометрическими и физико-механическими характеристиками трубопровода и грунта;

$n$  - число полуволн, подбираемое таким образом, чтобы значение  $p_{кр}$  было минимальным.

Для найденной толщины  $\delta = 12$  мм  $p_1 = 4,68 \cdot 10^5$  Па, что (при  $p_2 = 6,17 \cdot 10^5$  Па) дает значение

$$p_{кр} = 2\sqrt{2p_2 p_1} = 4,81 \cdot 10^5 \text{ Па (при } n = 7). \quad (21)$$

Поскольку в режиме частичного вакуумирования трубопровода  $\Delta p = p_{атм} - p_{вн} = 5 \cdot 10^4 \text{ Па} < p_{кр}$ , то устойчивость формы кольца гарантирована.

Дополнительные растягивающие механические напряжения в стеклопластиковой оболочке могут появиться вследствие температурных и химических деформаций, возникающих при реконструкции и эксплуатации трубопровода.

Значения этих напряжений могут быть найдены из следующих формул:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_t = \varepsilon_t E_+^{(p)} - \tilde{\alpha} \Delta t E_+^{(p)}; \\ \Delta\sigma_x = \varepsilon_x E_+^{(p)}, \end{cases} \quad (21)$$

где  $\varepsilon_t$  и  $\varepsilon_x$  – относительная температурная и химическая деформация;

$\tilde{\alpha}$  - коэффициент линейного расширения стеклопластика;

$\Delta t = t_c - t_9$  - температурный перепад, равный разности температуры  $t_c$  при проведении строительных работ и температуры  $t_9$  эксплуатации трубопровода.

Неравенство (17) в случае совместного действия температуры и химических деформаций переходит в следующее:

$$\frac{N_A^{(3)}}{l\delta} + \frac{M_A^{(3)}(1 + \sqrt{m})}{l\delta^2} + \Delta\sigma_t + \Delta\sigma_x \leq R_+^{(p)}. \quad (22)$$

При среднем значении  $\tilde{\alpha} = 7,5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ , при перепаде температур

$\Delta t = +15^\circ\text{C}$  и относительной деформации  $\varepsilon_x = 0,001$

$$\Delta\sigma_t = 13,4 \text{ МПа}; \quad \Delta\sigma_x = 14 \text{ МПа}.$$

Минимальные значения  $\delta$ , найденные с учетом температурной и химической усадок из неравенства (22), равняются:

$$\begin{cases} \delta = 19 \text{ мм} (\Delta\sigma_t = 13,4 \text{ МПа}; \Delta\sigma_x = 0); \\ \delta = 18 \text{ мм} (\Delta\sigma_t = 0; \Delta\sigma_x = 11,9 \text{ МПа}); \\ \delta = 110 \text{ мм} (\Delta\sigma_t = 13,4 \text{ МПа}; \Delta\sigma_x = 11,9 \text{ МПа}). \end{cases} \quad (23)$$

Значение  $\delta = 110$  мм носит оценочный характер, поскольку в этом случае оболочка не является тонкой и должны учитываться радиальные напряжения. Тем не менее, эта толщина указывает на необходимость достаточно тщательного подбора стеклопластика и обеспечение соответствующей технологии ремонтно-восстановительных работ.

**В четвертом разделе** рассматривается поведение бинарной оболочки «металл-стеклопластик», полученной после реконструкции трубопровода, под воздействием нагрузок и с учетом продолжающейся коррозии на внешней поверхности металла.

Представляет собой интерес оценка времени  $\tau_{ост}$ , после истечения которого произойдет полная потеря несущей способности металлической составляющей бинарной оболочки (остаточный ресурс по металлу).

Приведенную изгибную жесткость бинарной оболочки предлагается рассчитывать по следующей формуле:

$$(EI)_{np} = E_m \tilde{\delta}_m l \left[ \frac{1}{12} \tilde{\delta}_m^2 + (0,5 \tilde{\delta}_m - \tilde{\delta}_n)^2 \right] + E \delta l \left[ \frac{1}{12} \delta^2 + (0,5 \delta - \tilde{\delta}_n)^2 \right] \quad (24)$$

$E_m = 2,06 \cdot 10^5$  МПа - модуль деформации стали;

$\tilde{\delta}_m$  - средняя (по периметру) толщина металлической стенки;

$\tilde{\delta}_n$  - среднее (по периметру) расстояние от нейтрального слоя бинарной оболочки до наружной поверхности стеклопластика, определяемое как

$$\tilde{\delta}_n = \frac{E_m \tilde{\delta}_m^2 - E \delta^2}{2(E_m \tilde{\delta}_m + E \delta)}. \quad (25)$$

Значение  $\tilde{\delta}_n$  берется по результатам инспекции трубопровода на начальном этапе реконструкции.

Характер протекания внешнего коррозионного процесса для случая бинарной оболочки иллюстрируется на рис.б.

Предполагается, что интенсивная коррозия локализована в достаточно малой области нагруженной поверхности металла с начальной толщиной стенки  $\delta_m(0)$  (на рис.6 эта область находится около сечения  $A - A'$ ).

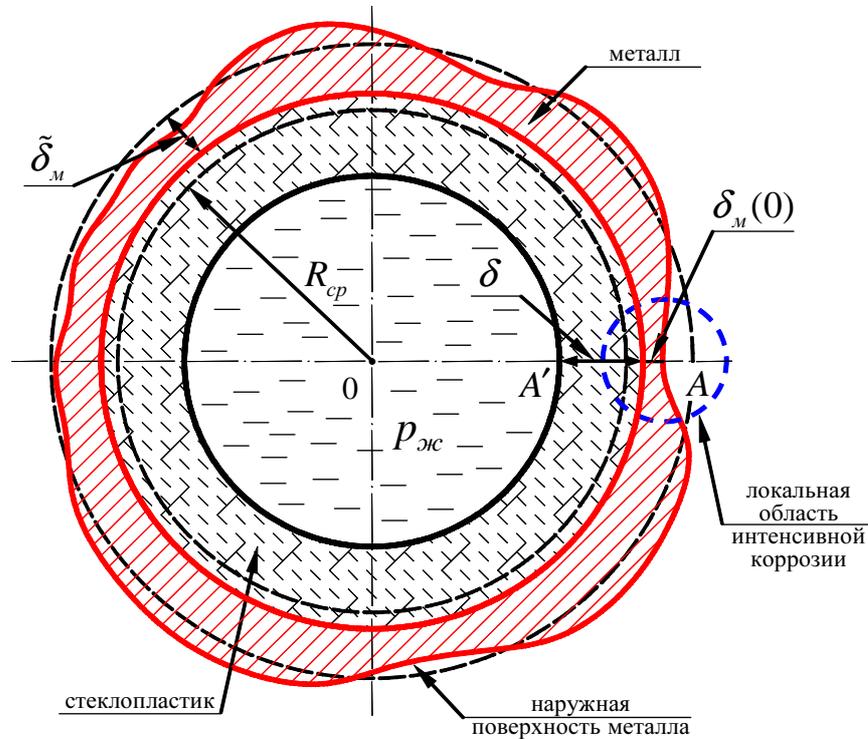


Рис.6. Утонение металлической стенки в области интенсивной локальной коррозии

Считается, что дальнейшее утонение металлической стенки в зоне интенсивной коррозии практически не влияет на значение приведенной изгибной жесткости  $(EI)_{пр}$ . В таком случае временное изменение толщины металлической стенки  $\delta_m(\tau)$  в зоне интенсивной коррозии может быть описано следующим алгоритмом (в качестве примера берется коррозия на внешней боковой образующей металла в сечении  $A - A'$ ):

1. По известному начальному значению  $\delta_m(0)$  с использованием формулы (25) находится локальное значение  $\delta_n(0)$ :

$$\delta_n(0) = \frac{E_m \delta_m^2(0) - E \delta^2}{2[E_m \delta_m(0) + E \delta]}. \quad (26)$$

2. Вычисляется начальное напряжение на внешней поверхности металла:

$$\sigma^{(\max)}(0) = \frac{3|M_A|E_m[\delta_m(0) - \delta_n(0)]}{E_l[\delta_m^3(0) + 3\delta_m^2(0)\delta_n(0) + 3\delta_m(0)\delta_n^2(0)] + El[\delta^3 + 3\delta^2\delta_n(0) + 3\delta\delta_n^2(0)]} + \frac{N_A}{l\left[\delta_m(0) + \frac{E}{E_m}\delta\right]}, \quad (27)$$

где  $M_A$  и  $N_A$  – внутренние силовые факторы, определяемые по формулам (10) и (6) для 3-его варианта загрузки с учетом соотношения (24).

3. По заданному шагу по времени  $\Delta\tau$  по формуле Гутмана вычисляется толщина металлической стенки через промежуток времени  $\Delta\tau$ :

$$\delta_m(\Delta\tau) = \delta_m(0) - V_0 \exp\left(\frac{\sigma^{(\max)}\nu}{3RT_g}\right)\Delta\tau, \quad (28)$$

где  $\nu = 7 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/моль – мольный объем железа;

$R$  и  $T_g$  – универсальная газовая постоянная и абсолютная температура эксплуатации трубопровода;

$V_0$  – линейная скорость коррозии в отсутствии механических напряжений ( $\sigma^{(\max)} = 0$ ).

4. Найденное значение  $\delta_m(\Delta\tau)$  подставляется в 1, после чего процесс повторяется.

5. Количество шагов  $N$  по времени находится из соотношения

$$\sigma^{(\max)}(n\Delta\tau) = \sigma_{np}, \quad (29)$$

где  $\sigma_{np}$  – предел прочности (временное сопротивление) стали.

На рис.7 приведены графики, иллюстрирующие динамику коррозионного процесса для бинарной оболочки и для металлической стенки трубопровода, эксплуатируемого без реконструкции.

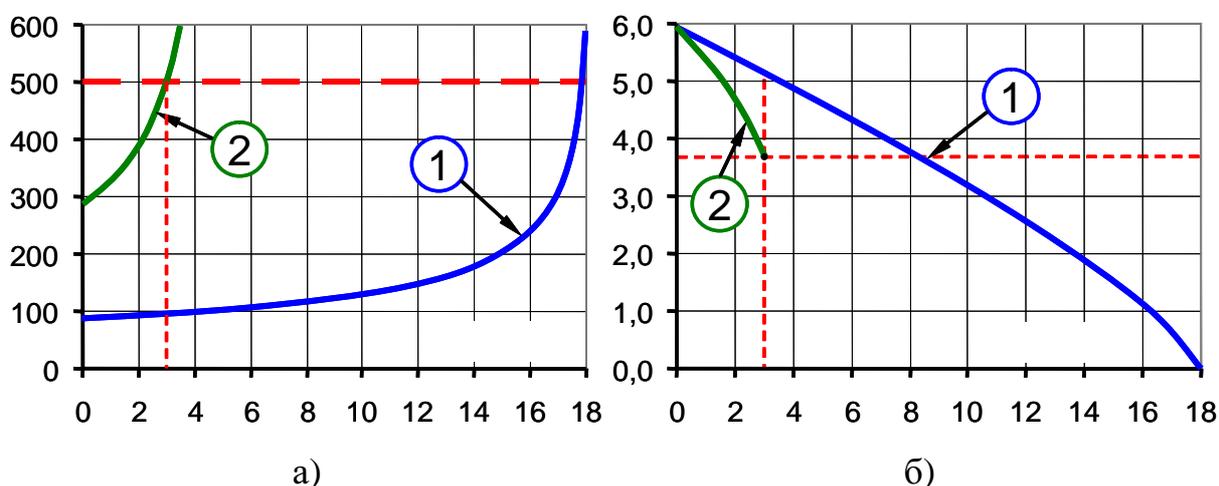


Рис.7. Зависимости уровня растягивающего напряжения в металлической стенке (а) и ее толщины (б) от времени  $\tau$   
1 – бинарная оболочка; 2 – металлическая стенка без стеклопластика

Графики получены при следующих расчетных данных, полученных для указанного трубопровода:

$$\delta = 12\text{мм}; \tilde{\delta}_m = 10\text{мм}; \delta_m(0) = 6\text{мм}; l = 1\text{м};$$

$$E_m = 2,06 \cdot 10^5 \text{МПа}; E = 1,02 \cdot 10^4 \text{МПа}; \sigma_{np} = 500\text{МПа};$$

$$N_A = 370\text{кН}; M_A = -1,34\text{кН} \cdot \text{м}; T = 280\text{К}; V_0 = 0,2\text{мм/год}$$

Таким образом, предлагаемый способ реконструкции металлического трубопровода дает существенное (в 5-6 раз) увеличение остаточного ресурса по металлу, что объясняется перераспределением механических напряжений в бинарной стенке. Следует отметить, что предложенный алгоритм расчета утонения металлической стенки может быть применен и в случае равномерной коррозии на внешней поверхности трубопровода.

### **Основные выводы по работе**

1. Разработана расчетная схема взаимодействия трубопровода большого диаметра с окружающим грунтом при различных вариантах загрузки трубопровода и определены внутренние силовые факторы в стенке трубопровода большого диаметра.
2. Рассчитано напряженно-деформированное состояние стенки стеклопластиковой оболочки с учетом ее анизотропии.
3. Выявлены опасные сечения стеклопластиковой оболочки, по которым определена ее необходимая толщина, обеспечивающая безопасную эксплуатацию.
4. Предложен алгоритм, позволяющий рассчитать утонение металлической стенки трубопровода большого диаметра в зоне коррозионного повреждения.
5. Разработана методика оценки остаточного ресурса (по металлу) трубопровода после его ремонта.

### **Основные положения диссертации отражены в следующих работах:**

1. Шустов С.В. Исследование прочностных характеристик стеклопластиковых труб и их устойчивости / Шустов С.В., Кушнир С.Я., Горковенко А.И., Игнатко В.М. // Проблемы эксплуатации транспортных систем в суровых условиях: Мат.региональной научно-практической конференции/ Отв.редактор Ш.М. Мерданов.-Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – С. 43-46.
2. Шустов С.В. Проблемы реконструкции водоводов большого диаметра стеклопластиковыми оболочками / Шустов С.В., Кушнир С.Я., Горковенко А.И. // Проблемы эксплуатации транспортных систем в суровых условиях: Мат.региональной научно-практической конференции/ Отв.редактор Ш.М. Мерданов.-Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – С. 46-49.

3. Шустов С.В. Определение внутренних силовых факторов в стенке трубопровода большого диаметра с учетом отпора грунта / Шустов С.В., Горковенко А.И., Мартынюк О.С. // Интерстроймех – 2005: Труды международной научно-технической конференции. Часть II. / Отв.редакторы А.А.Серебренников, Ш.М.Мерданов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. – С. 164-168.

4. Шустов С.В. Расчет напряженно - деформированного состояния стенки стеклопластикового трубопровода / Шустов С.В., Горковенко А.И., Мартынюк О.С. // Интерстроймех – 2005: Труды международной научно-технической конференции. Часть II./ Отв.редакторы А.А.Серебренников, Ш.М.Мерданов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. – С. 168-171.

5. Шустов С.В. Расчет остаточного ресурса трубопровода с бинарной стенкой «металл-стеклопластик» / Шустов С.В., Горковенко А.И., Гостев В.В., Гербер А.Д. // Известия Вузов, «Нефть и газ».-Тюмень: ТГНГУ, №5, 2005г.- С.58-62.