

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МОДУЛЯ СУДОВОГО
ПОДВИЖНОГО ТРУБОПРОВОДА

Мировая потребность в природном газе постоянно растет. Осваиваются новые морские месторождения природного газа и новые технологии его добычи и транспортировки. При этом идет постоянная борьба за удешевление всей технологической цепочки от добычи до доставки газа конечному потребителю. Сравнительно новой и перспективной считается технология транспортировки CNG (сжатый природный газ), которая по сравнению с LNG позволяет значительно снизить затраты на морскую перевозку природного газа.

Транспортировать газ в сжатом виде можно с помощью судов-носителей подвижных трубопроводов. Существует несколько вариантов компоновки подвижного трубопровода на судне-носителе, одним из них может быть модульный пространственный змеевик [1, 2] (рис. 1).

Такая компоновка подвижного трубопровода является новой и все ее проектные и расчетные параметры требуют подробного исследования.

Вопросы прочности отдельных элементов таких трубопроводов опубликованы в [3, 4]. Описание судов, которые транспортируют газы, их конструкции описаны в [5], но проблема определения параметров модуля в целом в этих публикациях не рассмотрена.

Цель данного исследования – создание математической модели для оптимизации в первом приближении параметров модуля подвижного трубопровода, который включает в себя стальной и стеклопластиковый слои.

Основой для создания математической модели послужили эскизные проработки модуля и патенты [1, 2].

Модуль состоит из рамной конструкции размеры, которой соответствуют размерам 40-футового морского контейнера и пространственного змеевика (рис. 1). Для облегчения конструкции большая часть змеевика представляет собой двухслойную композитную конструкцию. Внутренний слой – стандартные стальные трубы или переходники, внешний слой – намотанный стеклопластик (рис. 2, 3).

В состав змеевика входят элементы:

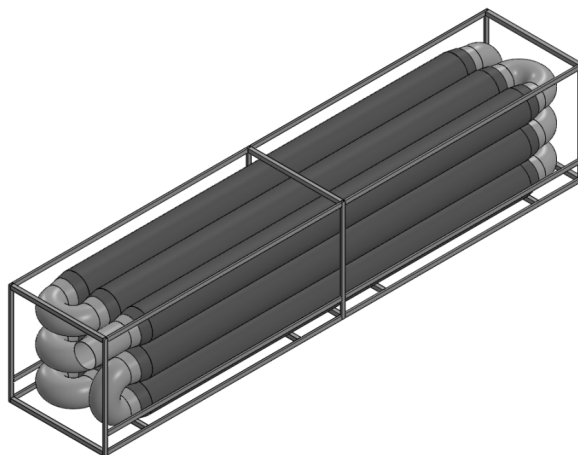
цилиндрические композитные отрезки труб (9 шт.) внешний диа-

метр стального слоя, которых 720 мм;

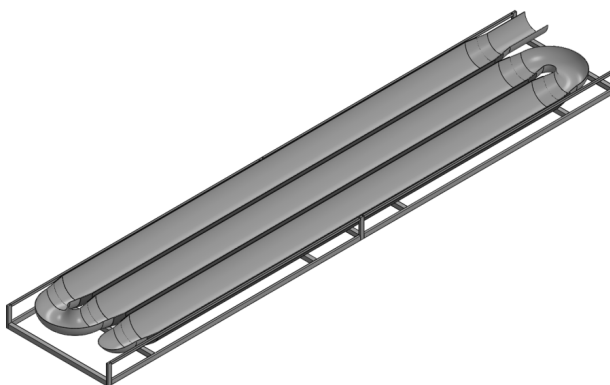
конусные переходники с частично намотанным по длине стеклопластиковым слоем (18 шт.), которые соединяют между собой цилиндрические отрезки и тороидальные колена;

тороидальные стальные колена (8 шт.), которые объединяют все отрезки труб в единый пространственный змеевик;

стальные цилиндрические переходники (2 шт.), которые необходимы для объединения модулей в блоки.



a)



б)

Рис. 1. Модуль пространственного змеевика подвижного трубопровода:
a – изометрия; *б* – сечение по первому ярусу змеевика

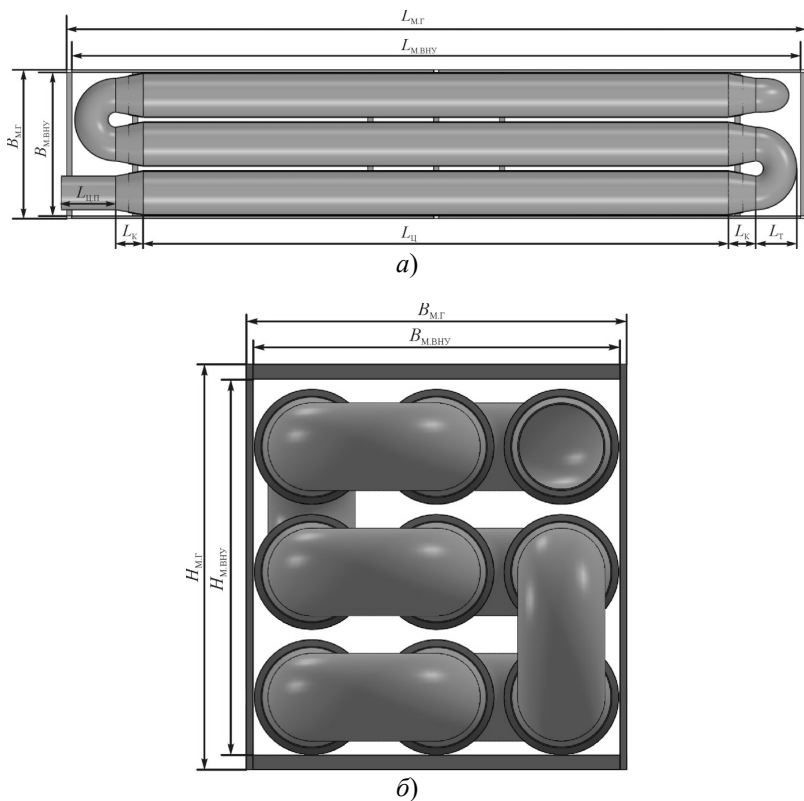


Рис. 2. Эскиз модуля: а – вид сверху на сечение первого яруса змеевика; б – вид справа

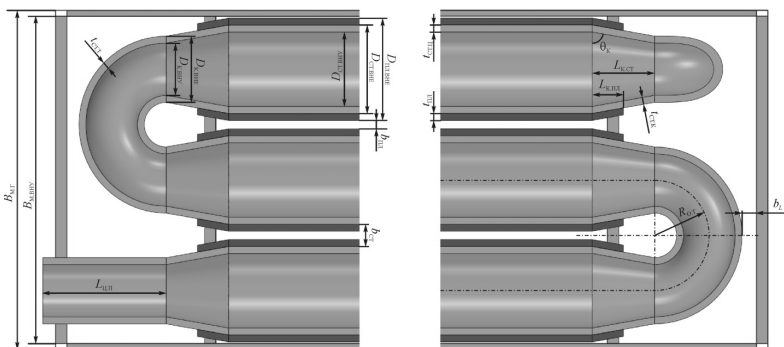


Рис. 3. Детальный эскиз вида сверху в районе тороидальных колен

Входные параметры математической модели следующие (см. рис. 2, 3):

- материал стальной части трубы – 30ХГСА;
- σ_T – предел текучести используемой стали, Па;
- σ_B – предел выносливости используемой стали, Па;
- $P_{\text{раб}}$ – рабочее давление в трубе, Па;
- $L_{\text{м.г}}$ – габаритная длина модуля (40-футового), м;
- $L_{\text{м.вну}}$ – длина внутреннего пространства модуля (40-футового), м;
- $B_{\text{м.г}}$ – габаритная ширина модуля (40-футового), м;
- $B_{\text{м.вну}}$ – ширина внутреннего пространства модуля (40-футового), м;
- $H_{\text{м.г}}$ – габаритная высота модуля (40-футового), м;
- $H_{\text{м.вну}}$ – высота внутреннего пространства модуля (40-футового), м;
- $\rho_{\text{ст}}$ – плотность стальной части трубы, кг/м³;
- $\rho_{\text{пл}}$ – плотность стеклопластиковой оболочки трубы, кг/м³;
- $D_{\text{ст.вне}}$ – внешний диаметр цилиндрической стальной части трубы, м;
- $m_{\text{об}}$ – масса рамной оболочки модуля, кг;
- $c_{\text{кг}}$ – стоимость 1 кг изделия рамной оболочки модуля, USD/кг;
- $c_{\text{ст}}$ – удельная стоимость металла трубы, USD/кг;
- $c_{\text{пл}}$ – удельная стоимость стеклопластика трубы, USD/кг;
- b_L – зазор между торцевыми балками модуля и трубой, м;
- θ_K – угол наклона образующей конуса, рад;
- $D_{\text{к.вне}}$ – внешний меньший диаметр конической части трубы, м;
- $L_{\text{к.пл}}$ – длина конической стеклопластиковой части трубы, м.

Суммарная толщина оболочки цилиндрической части змеевика определяется в первом приближении исходя из допущения, что стальной и стеклопластиковый слои равнопрочные и имеют одинаковую толщину.

Минимальная суммарная толщина оболочки трубы, $t_{\Sigma, \text{min}}$, м, определяется решением уравнения:

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\left(\frac{rP_{\text{раб}}}{t_{\Sigma, \text{min}}} - \frac{r^2 P_{\text{раб}}}{t_{\Sigma, \text{min}}(t_{\Sigma, \text{min}} + 2r)} \right)^2 + \left(\frac{rP_{\text{раб}}}{t_{\Sigma, \text{min}}} \right)^2 + \left(\frac{r^2 P_{\text{раб}}}{t_{\Sigma, \text{min}}(t_{\Sigma, \text{min}} + 2r)} \right)^2 \right)},$$

где σ_d – допустимый предел прочности, Па,

$$\sigma_d = \min \left(\frac{\sigma_T}{1,5}, \frac{\sigma_B}{2,4} \right);$$

$r = D_{\text{ст.вне}}/2$ – расчетный радиус трубы, м.

Принятая суммарная толщина оболочки трубы $t = t_{\text{ст.ц}} + t_{\text{пл}}$, м, должна быть больше $t_{\Sigma, \text{min}}$, где $t_{\text{ст.ц}}$ – принятая толщина стенки цилиндрической стальной части трубы, м; $t_{\text{пл}}$ – принятая толщина стеклопласти-

ковой оболочки трубы, м.

Для расчетов в первом приближении принимается: $t_{ст.ц} = t_{ст.к}$ – толщина стенки конической стальной части трубы, м; $t_{ст.т} = t_{ст.к}$ – толщина стенки тороидальной части трубы, м.

Зависимости математической модели:

стоимость рамной оболочки модуля, USD, $Ц_{об} = m_{об}Ц_{кг}$;

внутренний диаметр трубы, м, $D_{ст.вну} = D_{ст.вне} - 2t_{ст.ц}$;

внешний диаметр цилиндрической стеклопластиковой части трубы, м, $D_{пл.вне} = D_{ст.вне} + 2t_{пл}$;

максимальный зазор между стеклопластиковыми оболочками труб, м, $b_{пл} = (B_{м.вну} - 3D_{пл.вне})/2$;

максимальный зазор между стальными оболочками труб, м,

$$b_{ст} = b_{пл} + 2t_{пл} ;$$

радиус осевой линии тороидального колена трубы, м,

$$R_{о.т} = (D_{пл.вне} + b_{пл})/2 ;$$

длина грузовой зоны модуля, м, $L_{гр} = L_{м.вну} - 2b_L$;

внутренний меньший диаметр конической части трубы, м,

$$D_{к.вну} = D_{к.вне} - 2t_{ст.к} ;$$

длина конической стальной части трубы, м,

$$L_{к} = 0,5(D_{ст.вне} - D_{к.вне}) \cdot \text{tg } \theta_{К} ;$$

внешний радиус тороидального колена трубы, м,

$$L_{т} = R_{о.т} + 0,5D_{к.вне} ;$$

длина отрезка цилиндрической части трубы, м,

$$L_{ц} = L_{гр} - 2(L_{к} + L_{т}) ;$$

суммарная длина цилиндрической части длинномерной трубы, м, $L_{тр.ц} = 9L_{ц}$;

объем пространства в колене, м³, $V_{вну.т} = \pi^2 R_{о.т} D_{к.вну}^2 / 4$;

объем стали в колене, м³, $V_{ст.т} = \pi^2 R_{о.т} D_{к.вне}^2 / 4 - V_{вну.т}$;

объем пространства в отрезке цилиндрической трубы, м³,

$$V_{вну.ц} = \pi D_{ст.вну}^2 L_{ц} / 4 ;$$

объем стали в отрезке цилиндрической трубы, м³,

$$V_{ст.ц} = \pi D_{ст.вне}^2 L_{ц} / 4 - V_{вну.ц} ;$$

объем пластика в отрезке цилиндрической трубы, м³,

$$V_{\text{пл.ц}} = \pi(D_{\text{пл.вне}}^2 - D_{\text{ст.вне}}^2)L_{\text{ц}}/4;$$

объем пространства в конусе, м³, $V_{\text{вну.к}} = \pi(D_{\text{к.вну}}^2 + D_{\text{ст.вну}}^2)L_{\text{к}}/8;$

объем стали в конусе, м³, $V_{\text{ст.к}} = \pi(D_{\text{к.вне}}^2 + D_{\text{ст.вне}}^2)L_{\text{к}}/8 - V_{\text{вну.к}};$

внешний меньший диаметр конической стеклопластиковой части трубы, м, $D_{\text{пл.вне.к}} = D_{\text{пл.вне}} - (D_{\text{пл.вне}} - (D_{\text{к.вне}} + 2t_{\text{пл}}))L_{\text{к.пл}}/L_{\text{к}};$

объем пластика в конусе, м³,

$$V_{\text{пл.к}} = \pi L_{\text{к.пл}}(D_{\text{пл.вне}}^2 + 4D_{\text{пл.вне.к}}t_{\text{пл}} - D_{\text{ст.вне}}^2 - 4t_{\text{пл}}^2)/8;$$

длина одного цилиндрического переходника между модулями, м,

$$L_{\text{ц.п}} = L_{\text{м.вну}} - b_L - L_T - 2L_{\text{к}} - L_{\text{ц}} + 0,5(L_{\text{м.г}} - L_{\text{м.вну}}) + 0,1;$$

объем пространства в отрезке цилиндрического переходника, м³,

$$V_{\text{вну.п}} = \pi D_{\text{к.вну}}^2 L_{\text{ц.п}}/4;$$

объем стали в отрезке цилиндрического переходника, м³,

$$V_{\text{ст.п}} = \pi D_{\text{к.вне}}^2 L_{\text{ц.п}}/4 - V_{\text{вну.п}};$$

плотность газа в трубе (определяется в соответствии с [6]), кг/м³,

$$\rho_{\text{газ}}(P_{\text{раб}}) = f(P, t);$$

объем грузового пространства в змеевике, м³,

$$V_{\text{про}} = 9V_{\text{вну.ц}} + 18V_{\text{вну.к}} + 8V_{\text{вну.т}} + 2V_{\text{вну.п}};$$

объем стали в змеевике, м³, $V_{\text{ст}} = 9V_{\text{ст.ц}} + 18V_{\text{ст.к}} + 8V_{\text{ст.т}} + 2V_{\text{ст.п}};$

объем стеклопластика в змеевике, м³, $V_{\text{пл}} = 9V_{\text{пл.ц}} + 18V_{\text{пл.к}};$

масса газа в змеевике, кг, $m_{\text{газ}} = V_{\text{про}}\rho_{\text{газ}}(P_{\text{раб}});$

масса стали в змеевике, кг, $m_{\text{ст}} = V_{\text{ст}}\rho_{\text{ст}};$

масса стеклопластика в змеевике, кг, $m_{\text{пл}} = V_{\text{пл}}\rho_{\text{пл}};$

масса змеевика с газом, кг, $m_{\text{тр.бр}} = m_{\text{газ}} + m_{\text{ст}} + m_{\text{пл}};$

масса модуля с газом, кг, $m_{\text{м}} = m_{\text{об}} + m_{\text{тр.бр}};$

массовое совершенство змеевика, кг/литр,

$$k_{\text{тр}} = (m_{\text{ст}} + m_{\text{пл}})/(V_{\text{про}} 1000);$$

коэффициент расширения газа $k_{\text{расш}} = \rho_{\text{газ}}(P_{\text{раб}})/\rho_{\text{газ}}(P_{\text{н.у}}, t_{\text{н.у}})$, где

$$P_{\text{н.у}} = 101325 \text{ Па}, t_{\text{н.у}} = 15^{\circ} \text{ C};$$

объем газа в трубе при н.у, м³, $V_{\text{газ.ну}} = V_{\text{про}}k_{\text{расш}};$

стоимость стали змеевика, USD, $\text{Ц}_{\text{ст}} = \text{ц}_{\text{ст}}m_{\text{ст}};$

стоимость стеклопластика змеевика, USD, $\Pi_{\text{пл}} = \Pi_{\text{пл}} m_{\text{пл}}$;

стоимость модуля, USD, $\Pi_{\text{м}} = (\Pi_{\text{об}} + \Pi_{\text{ст}} + \Pi_{\text{пл}}) k_{\text{раб}}$, где $k_{\text{раб}} = 1,35$ – коэффициент, учитывающий стоимость сварочных и монтажных работ;

удельная стоимость модуля, USD/литр, $\Pi_{\text{м.л}} = \Pi_{\text{м}} / (V_{\text{про}} \cdot 1000)$.

Проверка прочности в первом приближении проводится исходя из условия $\sigma_{\text{IV}} < \sigma_{\text{д}}$, где

$$\sigma_{\text{IV}} = \sqrt{0,5 \left((\sigma_{\text{к}} - \sigma_{\text{ос}})^2 + \sigma_{\text{к}}^2 + \sigma_{\text{ос}}^2 \right)}$$

действующие напряжения по Мизесу; $\sigma_{\text{к}} = r P_{\text{раб}} / t$ – кольцевые напряжения, Па; $\sigma_{\text{ос}} = r^2 P_{\text{раб}} / (t(t + 2r))$ – осевые напряжения, Па.

С помощью разработанной математической модели для исходных данных, показанных в табл. 1 получены параметры модуля подвижного трубопровода, показанные в табл. 2.

Таким образом, получена математическая модель, которая позволяет оптимизировать в первом приближении параметры модуля подвижного трубопровода, включающего в себя стальной и стеклопластиковый слой.

Таблица 1

Исходные данные тестового расчета

Наименование величины	Обозначение величины	Значение
1	2	3
Предел текучести используемой стали, МПа	$\sigma_{\text{т}}$	830
Предел выносливости используемой стали, МПа	$\sigma_{\text{в}}$	1080
Рабочее давление в трубе, атм	$P_{\text{раб}}$	200
Габаритная длина модуля, м	$L_{\text{м.г}}$	12,19
Длина внутреннего пространства модуля, м	$L_{\text{м.вну}}$	12,032
Габаритная ширина модуля, м	$B_{\text{м.г}}$	2,44
Ширина внутреннего пространства модуля, м	$B_{\text{м.вну}}$	2,352
Габаритная высота модуля, м	$H_{\text{м.г}}$	2,59
Высота внутреннего пространства модуля, м	$H_{\text{м.вну}}$	2,40
Плотность стальной части трубы, кг/м ³	$\rho_{\text{ст}}$	7700
Плотность стеклопластиковой оболочки трубы, кг/м ³	$\rho_{\text{пл}}$	2000

Продолжение табл. 1

1	2	3
Внешний диаметр цилиндрической стальной части трубы, м	$D_{ст.вне}$	0,720
Масса рамной оболочки модуля, кг	$m_{об}$	1200
Стоимость 1 кг изделия рамной оболочки модуля, USD/кг	$Ц_{кг}$	1,35
Удельная стоимость металла трубы, USD/кг	$Ц_{ст}$	2,5
Удельная стоимость стеклопластика трубы, USD/кг	$Ц_{пл}$	10
Зазор между торцевыми балками модуля и трубой, м	b_L	0,10
Угол наклона образующей конуса, градусы	θ_K	80
Внешний меньший диаметр конической части трубы, м	$D_{к.вне}$	0,56
Длина конической стеклопластиковой части трубы, м	$L_{к.пл}$	0,227

Таблица 2

Основные параметры модуля подвижного трубопровода

Наименование величины	Обозначение величины	Значение
1	2	3
Принятая толщина стенки цилиндрической стальной части трубы, мм	$t_{ст.ц}$	8
Принятая толщина стеклопластиковой оболочки трубы, мм	$t_{пл}$	8
Суммарная длина цилиндрической части длинномерной трубы, м	$L_{тр.ц}$	86
Плотность газа в трубе, кг/м ³	$\rho_{газ}$	167,715
Объем грузового пространства в змеевике, м ³	$V_{про}$	38,826
Масса газа в змеевике, кг	$m_{газ}$	6512
Масса стали в змеевике, кг	$m_{ст}$	14140
Масса стеклопластика в змеевике, кг	$m_{пл}$	3289
Масса змеевика с газом, кг	$m_{тр.бр}$	23941
Масса модуля с газом, кг	m_M	25141
Массовое совершенство змеевика, кг/литр	$k_{тр}$	0,449
Объем газа в трубе при н.у, м ³ ;	$V_{газ.нУ}$	9705
Стоимость модуля, USD	$Ц_M$	94306
Удельная стоимость модуля, USD/литр	$Ц_{м.л}$	2,429

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Деклараційний патент на корисну модель № 67664 Україна, МПК F17C 5/00. Спосіб транспортування стиснутого природного газу рухомим трубопроводом [Текст] / Патон Б.Є., Крижанівський Є.І., Савицький М.М., Щвидкий Е.А., Зайцев В.В., Мандрик О.М.; заявник і патентотримач Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. - № u201114580; заявл. 08.12.11; опубл. 27.02.12 // Промислова власність. – 2012. – Бюл. № 4.

2. Деклараційний патент на корисну модель № 67658 Україна, МПК B63B 25/00. Баржа-пліт для транспортування стиснутого природного газу [Текст] / Патон Б.Є., Крижанівський Є.І., Савицький М.М., П'ятничко О.І., Зайцев В.В., Мандрик О.М.; заявник і патентотримач Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. - № u201113979; заявл. 28.11.11; опубл. 27.02.12 // Промислова власність. – 2012. – Бюл. № 4.

3. Зайцев Вал.В. Исследование прочности коническо-цилиндрических элементов подвижных трубопроводов [Текст] / Вал.В. Зайцев, Д.В. Зайцев, В.В. Зайцев // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции "Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте '2012". – Выпуск 2. Том 1. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012 – ЦИТ: 212 - 244 – С. 39 – 42.

4. Зайцев Вал.В. Исследование прочности коническо-сферических элементов подвижных трубопроводов [Текст] / Вал.В. Зайцев, Д.В. Зайцев, В.В. Зайцев // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции "Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2012". – Выпуск 3. Том 1. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012 – ЦИТ: 312 - 287 – С. 28 – 32.

5. Зайцев В. В. Суда-газовозы [Текст] / В.В. Зайцев, Ю.Н. Коробанов. – Л.: Судостроение, 1990. – 304 с.

6. Зайцев В.В. Начальное проектирование баллонов для CNG-газовозов / Зайцев В.В., Зайцев Вал.В. // Електронне видання Вісник НУК: зб. наук. праць. – 2010. – № 2. – Миколаїв: НУК. – С. 3 – 12.