

К. Н. Сахно

РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАСС ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ МОНТАЖЕ

Введение

Одной из важнейших тенденций в современном судостроении является повышение эффективности производства путем внедрения технологии предварительного изготовления труб по проектной информации без пригонки «по месту» [1–3]. Наличие в проектной документации достоверной информации, достаточной для предварительного изготовления и монтажа отдельных труб, позволяет параллельно проводить ряд работ по постройке судна и сократить сроки выполнения судостроительных заказов. Появляется возможность создания региональных центров, работающих по автоматизированной технологии изготовления труб. Новая технология предъявляет определенные требования к процессу проектирования, который должен обеспечить точность взаимного расположения труб и оборудования, снижение трудоемкости сборочных работ, повышение качества документации по трубопроводным системам, базирующееся, в частности, на научно обоснованных методах их проектирования. Ниже приводятся результаты теоретических исследований и экспериментальных расчетов области компенсации возможных отклонений в трассах трубопроводов.

Основные положения

I. Постановка задачи

Траектория трубопровода (трасса) задается последовательностью точек T_1, T_2, \dots, T_m . Каждая из них может быть либо точкой изгиба (изменения направления трассы), либо точкой фланцевого соединения двух труб (без изменения направления трассы). Номера (индексы) точек фланцевого соединения задаются массивом s_1, s_2, \dots, s_i . При необходимости s_i могут быть вычислены по T_i .

Трубы, для которых начальный и конечный прямые участки параллельны, можно поворачивать вокруг своей оси на угол до 15° . При этом оставшаяся часть трассы перемещается в пространстве без изменения положения. Область, которую опишет конечная точка $A = T_m$, называется *областью компенсации возможных отклонений*. Кратко – *область компенсации*.

Необходимо построить уравнение области компенсации.

II. Построение области компенсации

1. Преамбула

При повороте трубы с параллельными концами вокруг своей оси конечная точка трубы описывает дугу окружности. При этом конечная точка трассы движется по «параллельной» ей окружности (т. е. окружности с тем же радиусом и в параллельной плоскости). При одновременном вращении двух разных труб с параллельными концами конечная точка движется по некоторой поверхности (если оси этих труб не параллельны). При вращении трех и более труб с тремя некопланарными осями (т. е. не лежащими в одной плоскости) область компенсации представляет собой трехмерное тело.

2. Параметры дуги

Параллельность концов. Пусть есть труба, заданная точками $T_i, T_{i+1}, \dots, T_{j+1}, T_j; j \geq i + 2$.

Кроме начальной и конечной должно быть не менее двух точек изгиба, чтобы концы трубы могли быть параллельными. Определить, параллельны ли концы трубы, можно, вычислив угол между направлениями в начале и в конце.

Найдем направление в начале: $\vec{V}_1 = \overrightarrow{OT_{i+1}} - \overrightarrow{OT_i}$ и нормируем его: $\vec{v}_1 = \frac{\vec{V}_1}{\|\vec{V}_1\|}$. Найдем также

направление в конце: $\vec{V}_2 = \overrightarrow{OT_j} - \overrightarrow{OT_{j-1}}$; $\vec{v}_2 = \frac{\vec{V}_2}{\|\vec{V}_2\|}$. Угол можно найти через скалярное или век-

торное произведения: $\cos \gamma = (\vec{v}_1, \vec{v}_2)$, $\sin \gamma = \left[\vec{v}_1, \vec{v}_2 \right]$. Как известно, для параллельных линий

$$\cos \gamma = 1; \sin \gamma = 0. \quad (1)$$

Допустим, что заданная труба отвечает этому требованию. Найдем параметры дуги окружности, которую будет описывать конец трубы.

Нормаль. Нормалью будет, собственно, направление в начале:

$$\vec{n} = \vec{v}_1.$$

Радиус. Для определения радиуса найдем вектор, соединяющий начало и конец трубы: $\vec{\Delta T} = \vec{OT}_j - \vec{OT}_i$. Тогда радиус будет:

$$R = \sqrt{(\vec{\Delta T}, \vec{\Delta T}) - (\vec{\Delta T}, \vec{n})^2}. \quad (2)$$

Если радиус близок к нулю, значит, вся труба лежит на одной прямой и ее вращение бессмысленно.

Центр. Центр получается параллельным переносом от конца трубы к концу трассы:

$$\vec{OC} = \vec{OT}_m + (\vec{\Delta T}, \vec{n}) \cdot \vec{n} - \vec{\Delta T}. \quad (3)$$

Базис. Для задания плоскости окружности необходимо три базисных вектора. Один из них (нормаль) уже найден, два других определяются по формулам

$$\vec{e} = \frac{\vec{OT}_m - \vec{OC}}{R}, \quad \vec{u} = [\vec{n}, \vec{e}]. \quad (4)$$

Уравнение окружности S_1 .

$$\vec{OF}(t) = R\vec{e} \cos(t) + R\vec{u} \sin(t) + \vec{OC}, \quad -\alpha \leq t \leq \beta, \quad (5)$$

где F – произвольная точка окружности

3. Область компенсации

Переберем все сочетания стыков, т. е. все трубы и последовательные соединения труб. Выберем из них варианты с параллельными концами, проверяя условие (1). Полученная последовательность окружностей – материал для построения области компенсации.

Область компенсации S_2 , полученная по двум дугам:

$$\begin{aligned} \vec{OH}_3(t_1, t_2) &= R_1 \vec{e}_1 (\cos(t_1) - 1) + R_1 \vec{u}_1 \sin(t_1) + R_2 \vec{e}_2 \cos(t_2) + R_2 \vec{u}_2 \sin(t_2) + \vec{OC}_2; \\ &-\alpha_1 \leq t_1 \leq \beta_1; \quad -\alpha_2 \leq t_2 \leq \beta_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Область компенсации S_3 , полученная по трем дугам:

$$\begin{aligned} \vec{OH}_3(t_1, t_2, t_3) &= R_1 \vec{e}_1 (\cos(t_1) - 1) + R_1 \vec{u}_1 \sin(t_1) + R_2 \vec{e}_2 (\cos(t_2) - 1) + R_2 \vec{u}_2 \sin(t_2) + \\ &+ R_3 \vec{e}_3 \cos(t_3) + R_3 \vec{u}_3 \sin(t_3) + \vec{OC}_3. \\ &-\alpha_1 \leq t_1 \leq \beta_1; \quad -\alpha_2 \leq t_2 \leq \beta_2; \quad -\alpha_3 \leq t_3 \leq \beta_3. \end{aligned} \quad (7)$$

Для построения графика следует зафиксировать каждую из переменных на граничном значении. Получится 6 поверхностей, ограничивающих область S_3 .

Область компенсации S_k , полученная по k дугам ($k \geq 3$):

$$\begin{aligned} \vec{OH}_k(t_1, \dots, t_k) &= \sum_{i=1}^k (R_i \vec{e}_i (\cos(t_i) - 1) + R_i \vec{u}_i \sin(t_i)) + R_k \vec{e}_k + \vec{OC}_k. \\ &-\alpha_i \leq t_i \leq \beta_i; \quad i = 1, 2, \dots, k. \end{aligned} \quad (8)$$

Поскольку мы строим область в трехмерном пространстве, независимыми переменными могут быть только три параметра t_i . Если мы зафиксируем остальные $k-3$ параметра в крайних значениях, то получим некоторые области. Эти области пересекаются. В частности, все они содержат точку A . Объединив их, получим область S_k .

Если мы зафиксируем $k-2$ параметра t_i , оставив 2 независимых, то получится $2^{k-2} C_k^{k-2} = 2^{k-3} k(k-1)$ поверхностей. Чтобы представить себе масштабы, приведем несколько примеров (табл. 1).

Таблица 1

Масштаб поверхностей, образующих область компенсации

k	3	4	5	6	7	8
$2^{k-3} k(k-1)$	6	24	80	240	672	1 792

Не все эти поверхности являются граничными. Некоторые поверхности расположены внутри области S_k .

III. Пример расчета

В качестве примера расчета выбрана трасса, состоящая из четырех труб (табл. 2).

Таблица 2

Расчетная трасса

№	X, мм	Y, мм	Z, мм
1	0	0	0
2	0	450	0
3	600	450	0
4	600	800	0
5	600	1 150	0
6	600	1 150	-500
7	600	1 535	-500
8	600	1 800	-500
9	0	2 500	-500
10	-298	2 500	-500
11	-700	2 500	-500
12	-700	2 500	-1 100
13	-700	2 900	-1 100

Номера точек фланцевых соединений $s = [1, 4, 7, 10, 13]$.

Из табл. 3 выбираются 3 дуги (рис. 1).

Таблица 3

Параметры окружностей, полученных вращением труб с параллельными концами

№	R , мм	\vec{i}	\vec{e}	\vec{OC} , мм
1	600	[0, 0, -1]	[1, 0, 0]	[-1 300, 2 900, -1 100]
2	781,02	[-0,64020, 0, -0,76824]	[0,76824, 0, -0,64020]	[-1 300, 2 900, -600]
3	500	[-1,0000, 0, 0]	[0, 0, -1]	[-700, 2 900, -600]
4	1 303,8	[-0,84369, 0, 0,53689]	[-0,53689, 0, -0,84369]	[0, 2 900, 0]
5	1 702,9	[-0,64595, 0, 0,76340]	[-0,76340, 0, -0,64595]	[600, 2 900, 0]
6	1 431,8	[-0,41905, 0, 0,90795]	[-0,90795, 0, -0,41905]	[600, 2 900, -500]

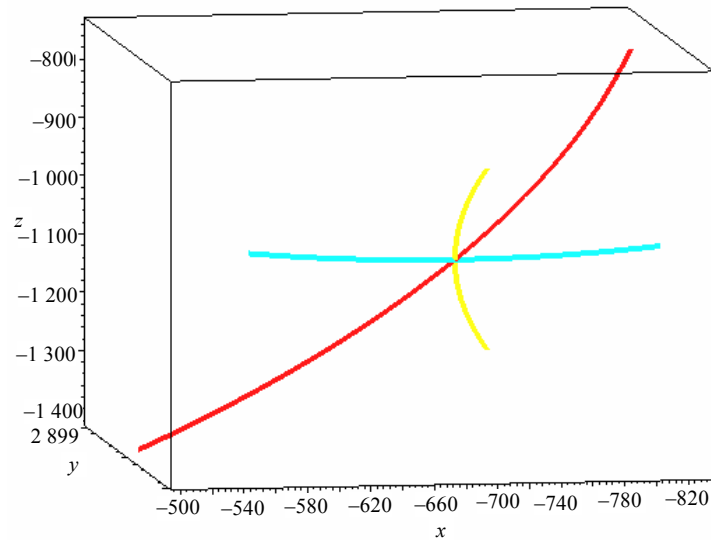
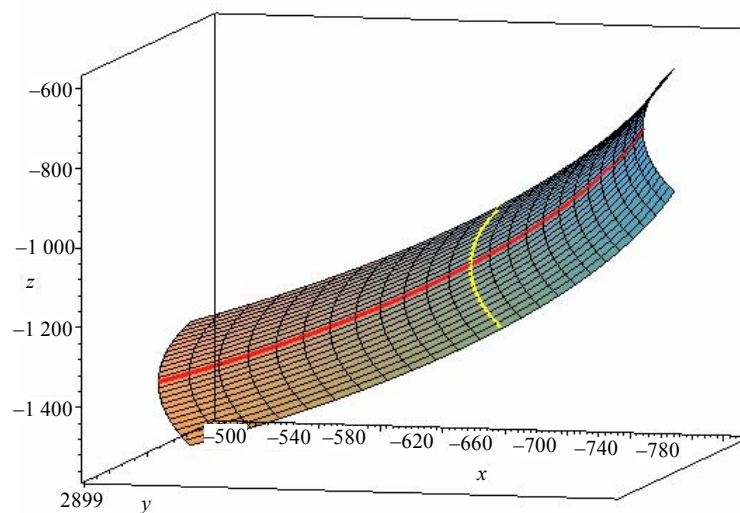


Рис. 1. Дуги № 1, 3, 6 (лежат в одной плоскости)

Уравнение поверхности S_2 , построенной по дугам № 1 и 6 (рис. 2):

$$\begin{aligned}x &= 600\cos(t_1) - 1300\cos(t_2) - 600\sin(t_2); \\y &= 2900; \\z &= -600\sin(t_1) - 600\cos(t_2) + 1300\sin(t_2) - 500; \\-\frac{\pi}{12} &\leq t_1 \leq \frac{\pi}{12}, \quad -\frac{\pi}{12} \leq t_2 \leq \frac{\pi}{12}.\end{aligned}$$

Рис. 2. Поверхность S_2 , построенная по дугам № 1 и 6

Уравнение области S_3 , построенной по дугам № 1, 3, 6 (рис. 3):

$$\begin{aligned}x &= 600\cos(t_1) - 500\sin(t_2) - 1300\cos(t_3) - 600\sin(t_3); \\y &= 2900; \\z &= -600\sin(t_1) - 500\cos(t_2) - 600\cos(t_3) + 1300\sin(t_3).\end{aligned}$$

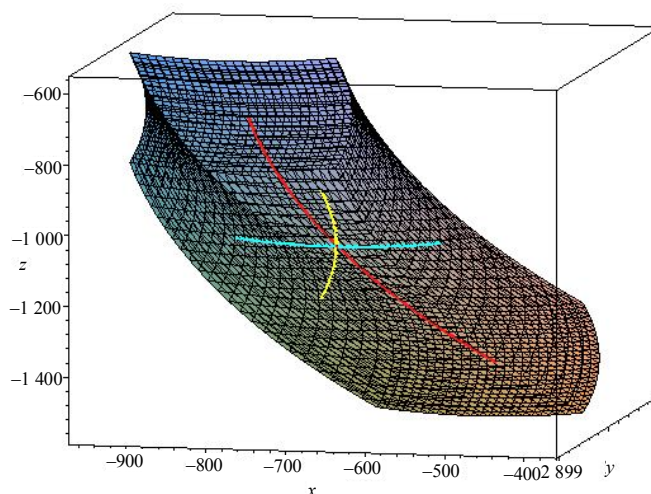


Рис. 3. Область S_3 , построенная по дугам № 1, 3, 6

Область S_3 также плоская, но ее площадь значительно больше. Для ее построения мы фиксировали значения каждого из параметров $t_i = -\frac{\pi}{12}$ и $t_i = \frac{\pi}{12}$. Таким образом, получили 6 поверхностей, которые затем нанесли на один график.

Построение областей S_4 , S_5 , S_6 требует соответственно 24, 80 и 240 поверхностей.

Заключение

Проведены теоретические исследования и экспериментальные расчеты области компенсации возможных отклонений в трассах трубопроводов.

Установлен масштабный характер трехмерных поверхностей, образующих область компенсации.

Результаты исследований составляют основу разрабатываемой теории проектирования трасс трубопроводов с учетом возможных перемещений при монтаже.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сахно К. Н. Исследование влияния погрешностей изготовления на точность координатных размеров труб сложных судовых технологических комплексов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: СПбГМТУ, 2000. – 24 с.
2. ОСТ 5.0005-81 / РД 5Р.0005-93 / Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Требования к проектированию, изготовлению и монтажу труб по эскизам и чертежам с координатами трасс трубопроводов. – Л.: НПО «Ритм».
3. Сахно К. Н. Исследования методов проектирования и технологии сборки трубопроводных систем // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2005. – № 10. – С. 3–6.

Статья поступила в редакцию 1.02.2008

DEVELOPMENT OF THE THEORY OF PIPELINE ROUTES PROJECTION TAKING INTO ACCOUNT POSSIBLE DISPLACEMENTS AT MOUNTING

K. N. Sakhno

The problem of construction of compensation field of possible deviations in pipeline routes is considered in the article. The results of theoretical researches and experimental calculations are given.

Key words: pipelines, projection, mounting, compensation field.