

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

Сахно К.Н. (АГТУ, г. Астрахань, Россия)

In this article the research results related to scientific basis of pipelines design methods are considered. The project results may be applied in designing pipelines irrespective of their functional purposes.

Введение.

Современное судно представляет собой сложный технологический комплекс, состоящий из различного вида оборудования, механизмов и других конструкций, для обеспечения работы которых служат системы трубопроводов.

Появление новых многофункциональных типов судов, усложнение применяемого оборудования влечет за собой увеличение количества труб различной конфигурации, которые необходимо компактно размещать на судне. Форма и размеры отдельных труб, необходимые для их изготовления, определяются пространственным расположением всего трубопровода. Традиционная технология и организация постройки судна предусматривает определение пространственного расположения трубопроводов «по месту» на строящемся объекте, с учетом размещения смежного оборудования, электротрасс и трубопроводов других систем. При этом точность обеспечивается за счет большого объема пригоночных работ, связанных с изменением размеров отдельных элементов труб, сборкой их с большим количеством дополнительных ручных операций «по месту».

За последние 30 лет трудоемкость всех трубопроводных работ (изготовление и монтаж на судне) выросла с 5 до 10-12% от общей трудоемкости постройки судна, а на некоторых проектах, в частности, рыбопромысловых судов – до 14-17%.

В этих условиях одной из важнейших отраслевых тенденций современного судостроения является повышение эффективности производства путем внедрения технологий предварительного изготовления труб по проектной информации без пригонки «по месту». Наличие в проектной документации достоверной информации, достаточной для предварительного изготовления и монтажа отдельных труб, позволяет запараллелить работы 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, в частности, основанное на научно-обоснованных методах их проектирования [1, 2].

Основное содержание и результаты работы.

Одним из важнейших этапов научного обоснования является построение области компенсации возможных отклонений в трассах трубопроводов (рис.1).

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_l . При необходимости s_i могут быть вычислены по T_i .

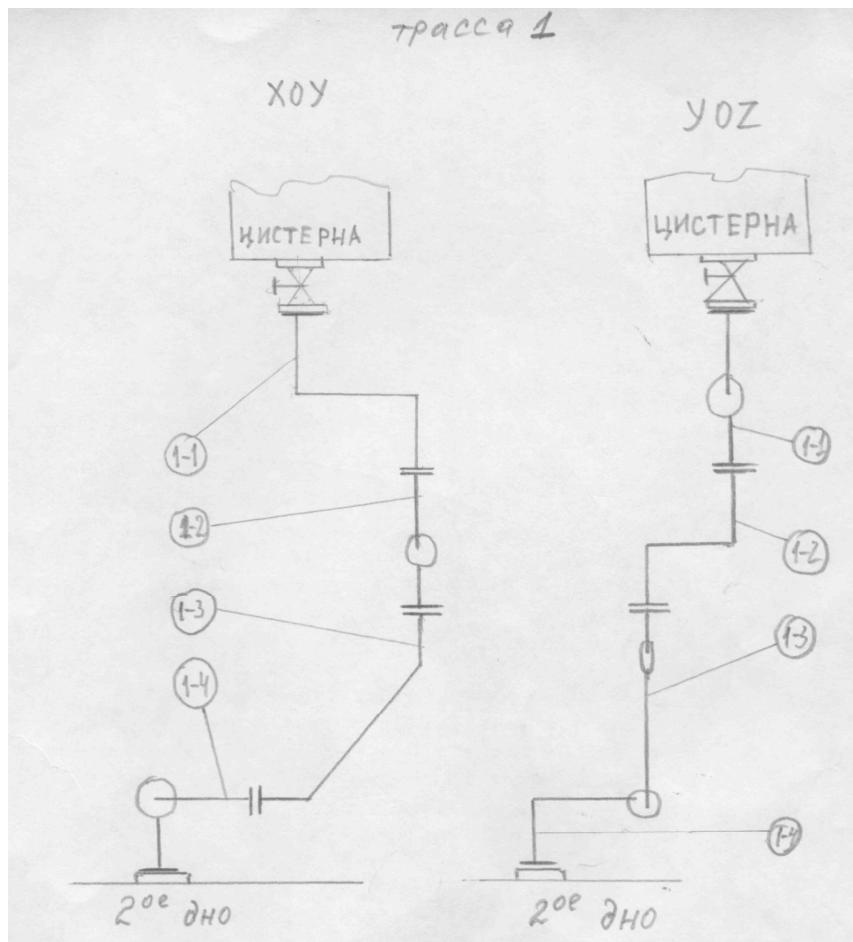


Рис.1. Пример трассы

Трасса должна соединить начальное и конечное фланцевые соединения, точное положение которых (относительно друг друга) в момент проектирования трассы неизвестно. Погрешность определяется *областью возможных отклонений* конечной точки трассы. Кратко – область отклонений. Эта область задается в виде прямоугольного параллелепипеда (определяется по результатам размерного анализа).

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

Построение области компенсации.

При повороте трубы с параллельными концами вокруг оси её первого конца конечная точка трубы описывает дугу окружности. Если после этого повернуть участок трассы, расположенный за вторым параллельным концом на тот же угол, но в обратном направлении, конечная точка трассы опишет ту же дугу окружности (т.е. окружности с тем же радиусом и в параллельной плоскости). При одновременном вращении двух разных труб с параллельными концами конечная точка трассы движется по некоторой поверхности (если оси этих труб не параллельны). При вращении трех и более труб с тремя некомпланарными осями (т.е. не лежащими в одной плоскости) область компенсации представляет собой трехмерное тело [3-5].

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 могли быть параллельны. 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 векторное произведения: $\cos \gamma = (\vec{v}_1, \vec{v}_2); \sin \gamma = [\vec{v}_1, \vec{v}_2]$. 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 $\vec{\Delta T} = \overrightarrow{OT_j} - \overrightarrow{OT_i}$. 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:

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

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

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

Уравнение окружности S_1 .

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

где F – произвольная точка окружности

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

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

Область компенсации S_3 , полученная по трем дугам (рис.2)

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

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

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

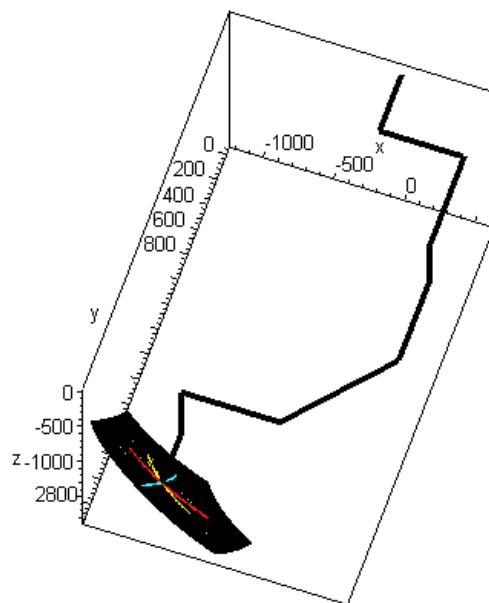


Рис.2. Трасса + область компенсации S_3

Заключение.

При формировании научных основ проектирования трасс сложных трубопроводных систем проанализировано современное состояние вопроса проектирования, изготовления и монтажа судовых трубопроводов. Рассмотрены преимущества и недостатки трассировки трубопроводов на стадии проектирования по сравнению с трассировкой «по месту». Отмечены причины недостоверности проектной информации и пути их устранения. Изучен процесс получения труб различной конфигурации и создана математическая база для определения влияния погрешностей выполнения отдельных операций изготовления на точность координатных размеров труб. Проведены экспериментальные исследования взаимосвязи конфигурации и отклонений координатных размеров труб. Разработана расчетная и методическая база для практических рекомендаций при проектировании трасс трубопроводов с учетом законов рассеивания суммарных погрешностей изготовления отдельных труб.

Сформированы научные основы компенсирования суммарных отклонений в трассах трубопроводов, различных конфигураций. Проведены экспериментальные исследования взаимосвязи компенсации суммарных отклонений и конфигурации трасс трубопроводов. Разработаны методы проектирования и сборки трубопроводных систем, учитывающие точность расположения труб и повышающие производительность трубопроводных работ.

Решению поставленных задач способствовала идея о представлении процесса получения конфигурации трубы посредством выполнения операций продвижения, погиба, разворота и резки, а также гипотеза о взаимосвязи компенсации суммарных отклонений и конфигурации трасс трубопроводов. Установлены аналитические зависимости, определяющие влияние точности выполнения указанных операций на отклонения координатных размеров труб. Расширено представление о возможности применения теории пространственных размерных цепей при проведении размерного анализа в процессе проектирования трасс трубопроводов. Предложена концепция взаимосвязи компенсации суммарных отклонений и конфигурации трасс трубопроводов. Создана математическая модель процесса компенсирования суммарных отклонений в трассах трубопроводов различных конфигураций. Разработанные по результатам исследований метод расчета, основанный на взаимосвязи конфигурации и отклонений координатных размеров труб, и методика проектирования и сборки трубопроводных систем, позволяют проектировать трассы трубопроводов с заданными отклонениями и изготавливать трубы без получения информации «по месту», обеспечивая сокращение сроков строительства и повышение производительности путем запараллеливания трубопроводных работ при формировании объекта и снижения, в среднем на 13-15%, трудоемкости изготовления труб. Судостроительные предприятия могут отказаться от дорогостоящего оборудования для гибки труб, способствуя созданию региональных центров, работающих по автоматизированной технологии изготовления труб. Результаты исследования могут быть использованы при разработке системы CAD/CAM проектирования трубопроводов и открывают возможность: расположения трубопроводов с учетом научно-обоснованных предельных отклонений и обеспечения заданных требований трассировки; совершенствования технологии изготовления труб по проектной информации с целью увеличения объема предварительно изготавливаемых труб без пригонки «по месту».

Результаты разработки применимы при проектировании трасс трубопроводов, независимо от их функционального назначения.

Список литературы: 1. Сахно, К.Н. Проектирование сложных судовых трубопроводных систем с учетом погрешностей их изготовления: моногр./ К.Н. Сахно; Астрахан. гос. техн. ун-т. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2008. – 84 с. 2. Микитянский В.В., Сахно К.Н. Проектирование и монтаж трасс сложных судовых трубопроводных систем // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2007. – №9. – С.3-6. 3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 832 с. 4. Сахно К.Н. Разработка теории проектирования трасс трубопроводов с учетом возможных перемещений при монтаже // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2008. – №2(43). – С.12-16. 5. Сахно К.Н., Иткин В.Ю. Задача о дуговых поверхностях как научное обоснование теории проектирования судовых трубопроводов. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2008. – №2. – С.12-14.

Сдано в редакцию 27.01.09