

## РАЗРАБОТКА ОБОБЩЁННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ И МОНТАЖА СУДОВЫХ СИСТЕМ ТРУБОПРОВОДОВ

*Сахно К.Н.<sup>1</sup>, Конева С.А.<sup>2</sup>, Цалоев В.М.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Астраханский государственный технический университет, Астрахань;*

<sup>2</sup>*Севастопольский государственный университет, Севастополь*

**Ключевые слова:** технологический процесс, судовые системы, математическая модель, изготовление трубопроводов, монтаж трубопроводов.

**Аннотация.** В соответствии с установленными показателями эффективности процессов изготовления и монтажа элементов судовых трубопроводов разработана обобщённая математическая модель процесса изготовления и монтажа судовых систем трубопроводов. В ней нет необходимости учитывать коэффициент влияния конструктивных особенностей собираемой конструкции и условий выполнения операций, учитывающий влияние кривизны и уклона сопряжений на продолжительность операции.

## DEVELOPMENT OF A GENERALIZED MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF MANUFACTURING AND INSTALLATION OF SHIP PIPELINE SYSTEMS

*Sakhno K.N.<sup>1</sup>, Koneva S.A.<sup>2</sup>, Tsalojev V.M.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Astrakhan State Technical University, Astrakhan;*

<sup>2</sup>*Sevastopol state University, Sevastopol*

**Keywords:** technological process, ship systems, mathematical model, production of pipelines, installation of pipelines.

**Abstract.** In accordance with the established performance indicators of the processes of manufacturing and installation of ship pipeline elements, a generalized mathematical model of the process of manufacturing and installation of ship pipeline systems has been developed. It is not necessary to take into account the factor of influence of structural peculiarities of the structure and conditions of the operations, taking into account effects of curvature and slope of mates for the duration of the operation.

### Особенности процесса изготовления судовых систем трубопроводов

Изготовление труб производится по принятой на заводе технологии в соответствии с техническими условиями, ведомственными нормами, инструкциями и рабочими чертежами [1,2]. Трубы, подвергаемые горячей гибке, направляют в песконабивочное отделение, где их набивают песком, нагревают на электро- или газовом горнах и гнут на плитах. Трубы, подвергаемые холодной гибке, направляют: стальные – непосредственно к трубогибным станкам; медные, медно-никелевые и латунные – на отжиг в электропечь.

На каждом судостроительном предприятии имеется самостоятельный цех или участок для изготовления труб на строящиеся или ремонтируемые суда. Изготовление труб и монтаж трубопроводов выполняют по монтажному чертежу или схеме с приложением к ним ведомости, в которой указываются номера

позиций труб, диаметры, длины, материал, а также присоединительная арматура (фланцы, отrostки, штуцеры, бобышки, крепеж, прокладки).

Технологический процесс изготовления и монтажа по эскизам и чертежам с координатами трасс трубопроводов состоит из следующих операций раскрой и резка заготовок гибка, сборка по эскизам, механическая обработка в процессе сборки, сварка, обработка после сварки, гидравлические испытания на прочность и цехе и другие виды контроля, химическая очистка, изоляция и покрытие труб, комплектация и передача на промежуточный склад или судно, установка на судне, пригонка забойных труб, монтаж и испытание на судне.

К технологии изготовления и монтажа трубопроводов предъявляются требования в соответствии с ОСТами.

Технологические службы завода выпускают материальные ведомости на трубы. По ведомостям цех получает необходимое количество труб со склада завода. Аналогичные ведомости составляются на присоединительную арматуру, крепеж, прокладки и пр. Со склада трубы поступают на заготовительный участок, где предварительно разрезаются на нужные длины в соответствии с картами раскроя.

После гибки трубы доставляют на слесарно-механический участок на обработку, в том числе обрезку концов по гибочным шаблонам, обжатие и отбортовку на прессе и вскрытие отверстий под отrostки. Затем трубы отправляют на участок сборки, пригонки и макетирования на специальных стендах. Там же выполняется прихватка фланцев и отrostков к трубам. Забойные трубы направляют для пригонки их по месту или по контрмакету. Труб, собираемые на фитингах, подают на станки для нарезки резьбы.

После слесарно-механической обработки и макетирования производится приварка или пайка фланцев, отrostков, бобышек, штуцеров и др. Учитывая, что при сварке может возникнуть деформация, фланцы и кольца протачивают на станках.

Полностью обработанные трубы поступают на участок гидравлических испытаний, затем на грунтовку и изоляцию. Труб некоторых трубопроводов направляют на участок химической очистки и оцинковки: их обезжиривают химическим способом, очищают от окалина и ржавчины и оцинковывают. Готовые трубы поступают непосредственно на судно для монтажа или на склад.

Для выполнения перечисленных операций цех имеет следующие участки: заготовительный, холодной гибки, горячей гибки, сборки и макетирования труб, газовой и электросварки, станочной обработки после сварки, гидравлического испытания труб, химической или дробеструйной очистки и грунтовки, изоляции.

Современный трубомедницкий цех, работающий поточным способом, должен иметь необходимые средства механизации и применять прогрессивную технологию обработки труб.

Для максимальной механизации изготовления труб и особенно гибки на станках и приварки фланцев, колен и отrostков имеется соответствующее оборудование. В настоящее время на многих судостроительных заводах вскрытие отверстий под отrostки выполняют на специальных станках фрезой, а обжатие концов труб и отбортовку - на гидравлических прессах. Широко применяется

полуавтоматическая и автоматическая сварка труб, механизированная нарезка резьбы на трубах, механизированные многопозиционные стенды для гидравлического испытания и др.

Применение прогрессивной технологии и новых средств механизации дает возможность значительно повысить производительность труда, ускорить процесс обработки труб и снизить себестоимость их изготовления.

### **Особенности процесса монтажа судовых систем трубопроводов**

Монтаж трубопроводов и систем на судне является одной из ответственных технологических операций [1,2]. При монтаже необходимо соблюдать следующие требования.

1. Разметку переборок, палуб, платформ под установку переборочных стаканов, наварышей и наклепышей производить в строгом соответствии с рабочими чертежами.

2. Трассы трубопроводов располагать наиболее рационально и так, чтобы было удобно производить судоремонт.

3. Монтируемые трубы не должны создавать дополнительных нагрузок на арматуру, механизмы или другие, связанные с ними конструкции и устройства. Для этого надо, чтобы натяг при сборке труб не превышал норм, предусмотренных техническими условиями.

4. Все поступающие на судно механизмы, арматура, приборы и другие изделия, входящие в состав трубопроводов или систем, должны иметь установленную маркировку и приемосдаточную документацию, подтверждающую их приемку ОТК завода-изготовителя.

5. Расконсервацию арматуры и других узлов трубопроводов, а также снятие предохранительных заглушек с них выполнять перед установкой узлов на место.

6. Механизмы и аппараты, присоединяемые к трубопроводам, монтировать до монтажа трубопроводов. В особых случаях допускается монтаж трубопроводов до установки механизмов.

7. Приварыши устанавливать в соответствии с действующей технической документацией.

8. Приварку приварышей и приклепывание наклепышей под донную арматуру производить при снятом цинковом протекторе с последующим снятием образовавшихся при сварке наплывов. Наклепыши устанавливают с парусиновой прокладкой.

9. Узлы, детали и арматуру трубопроводов и систем монтировать с учетом места расположения оборудования, механизмов и других трубопроводов, не перекрывать лазы и горловины.

10. Под подвески всех трубопроводов и систем для их плотного прилегания устанавливать прокладки в соответствии с техническими требованиями монтажа.

11. Монтаж трасс теплоконтроля производить по окончании монтажа связанных с ним трубопроводов и систем, на которых должна быть установлена необходимая присоединительная арматура (бобышки, штуцеры).

12. Смонтированные трубопроводы и арматуру окрашивать в соответствии с ведомостью на окраску, составленной на основании действующих правил по

окраске. Отличительные знаки и цвета их окраски должны соответствовать ГОСТ и нормам, действующим в судостроении.

После предварительной установки арматуры и труб и проверки её качества осуществляют окончательную сборку (монтаж) трубопроводов. При этом соединения труб разбирают, проверяют чистоту их внутренней поверхности, трубы продувают сжатым воздухом. Трубопровод собирают на штатных крепеже и прокладках. Хомуты постоянных подвесок закрепляют на трубах, хвостовики подрезают по месту, прихватывают и приваривают. Места приварки подвесок должны быть проверены на непроницаемость.

К началу монтажа изготавливают подвески и прокладки, подготавливают набивочный материал. Для крепления труб предусматривается несколько типов подвесок, рассчитанные как на одиночные трубы, так и на несколько параллельных. Подвески изготавливают заранее. При установке подвесок производят подгонку по месту их хвостовиков. Прокладки изготавливают заранее в соответствии с монтажной ведомостью. Для прокладок применяют паронит, прессшпан, резину, фибру, асбест, фторопласт, сталь, медь и другие материалы. Изготовление (вырезка) прокладок производится с помощью приспособлений или штампов.

Для трубопроводов, работающих под большим давлением, прокладки из прессшпана пропитывают олифой. Резиновые прокладки перед установкой натирают мелом или тальком для предотвращения «прикипания» к соединениям при повышенных температурах в судовых помещениях.

### **Разработка обобщённой математической модели исследуемых технологических процессов**

В соответствии с рассмотренными технологическими процессами разработаем математическую модель технологического процесса изготовления и монтажа элементов судовых трубопроводов.

Анализ известных моделей, представленных [3,4] показал, что они не в полной мере отражают техпроцесс и операции изготовления и монтажа элементов судовых трубопроводов и требуют корректировки.

Исходя из качественного анализа содержания исследуемых технологических процессов и анализа математических моделей в источниках [3,4] была получена система параметров и коэффициентов, которые включены в обобщённые математические модели этих процессов. Таким образом, в соответствии с установленными показателями эффективности процессов изготовления и монтажа элементов судовых трубопроводов были разработаны обобщённые модели этих процессов по критерию продолжительности времени и критерию энерготрат исполнителей, описывающие исследуемые процессы через полученные простейшие приемы.

Математическая модель изготовления элементов трубопроводов в цехе базируется на известной модели [3,4] и имеет вид:

$$T_{\Pi} = \sum_{i=1}^{i=m} k_{оп_i} \cdot T_{оп_i}; \quad (1)$$

$$T_{OP_i} = \sum_{j=1}^{j=m_1} k_{TKП_j} \cdot t_{TKП_j}^*; \quad (2)$$

$$t_{TKП_j} = k_{a_r} \cdot (t_P + t_{II} + t_3 + t_{II} + t_c); \quad (3)$$

$$t_P = t_{P_{НАЧ}} + \sum_{r=1}^{r=n} t_{P_{КОН}}; \quad (4)$$

$$t_{II} = t_{II_{НАЧ}} + \sum_{r=1}^{r=n_1} k_{II_r} \cdot t_{II_r} + t_{II_{КОН}}; \quad (5)$$

$$t_3 = \sum_{r=1}^{r=n_3} t_{3_r}; \quad (6)$$

$$t_c = l_C \cdot \sum_{u=1}^{u=f} \sum_{v=1}^{v=q} P(u) \cdot P(v) \cdot k_v \cdot t_v \quad (7)$$

$$t_{II} = k_{II_r} \cdot t_{II_r} = \sum_{r=1}^{r=n_3} k_{II_r} \cdot \left( \frac{Z_{II}}{v_{II}} + \frac{S}{v_S} + \frac{Z_{ОП}}{v_{ОП}} \right)_r; \quad (8)$$

где,  $t_{TKП}, t_P, t_{II}, t_3, t_{II}, t_c$  – соответственно продолжительность выполнения операций, а также актов принятия решений, взятия (откладывания) инструмента и приспособлений и подготовки оборудования, установки (закрепления) и снятия (отдачи) грузозахватного устройства, переходов и перемещений сборочных элементов и оборудования, выполнение операции оборудованием, рабочим;

$T_{ОП}, T_{II}$  – продолжительность выполнения операций и технологического процесса в целом;

$i, j, r$  – порядковые номера операций в технологическом процессе;

$m, m_1$  – полное количество операций в технологическом процессе;

$n, n_1, n_2, n_3$  – количество повторений одноименных актов;

$u$  и  $f$  – порядковые номера и количество вариантов приложения воздействий на каждой единице длины сопряжений;

$v$  и  $q$  – порядковые номера и количество интервалов (диапазонов) значений характеристик объемов работ;

$l_C$  – длина  $c$  – го сопряжения;

$Z_{II}, v_{II}, Z_{ОП}, v_{ОП}, S, v_S$  – соответственно высота и средняя скорость подъема, высота и средняя скорость опускания, расстояние и средняя скорость перемещения;

$t_{P_{НАЧ}}$  и  $t_{P_{КОН}}$ ;  $t_{II_{НАЧ}}$  и  $t_{II_{КОН}}$  – соответственно продолжительность принятия решений, взятия (откладывания) инструмента и приспособлений и подготовки оборудования пред началом и после окончания работ;

$t_{TKП}^*$  – продолжительность выполнения работ на горизонтально расположенной базе;

$k_{a_r}$  – коэффициенты совмещения работ во времени.

Математическая модель сборки элементов трубопроводов в цехе по критерию энерготрат исполнителей работ и имеет следующий вид:

$$E_{\Pi} = \sum_{i=1}^{i=m} E_{O\Pi i}; \quad (9)$$

$$E_{O\Pi i} = \sum_{j=1}^{j=m} E_{TK\Pi j}; \quad (10)$$

$$E_{TK\Pi j} = e_p + e_H + e_3 + e_{\Pi} + e_C, \quad (11)$$

$$e_p = \mathcal{E}_{H_p} \times t_p; \quad (12)$$

$$e_u = (e_p + e_H)(t_{u \text{ нач}} + \sum_{r=1}^{r=n1} t_{nr} \times t_{\text{нкон}}); \quad (13)$$

$$e_3 = (\mathcal{E}_n + \mathcal{E}_\tau) \left[ \sum_{r=1}^{r=n3} \left( \frac{Z_{\Pi}}{v_{\Pi}} + \frac{S}{v_S} + \frac{Z_{O\Pi}}{v_{O\Pi}} \right) \right]. \quad (14)$$

Как видно из формул 1-14, отличие [3,4] в том, что в ней нет необходимости учитывать коэффициент влияния конструктивных особенностей собираемой конструкции и условий выполнения операций, учитывающий влияние кривизны и уклона сопряжений на продолжительность операции.

Математическая модель монтажа элементов трубопроводов базируется на известной модели [3,4] и выглядит следующим образом:

$$T_{\Pi} = \sum_{i=1}^{i=m} T_{O\Pi i};$$

$$T_{O\Pi i} = \sum_{j=1}^{j=m} k_{TK\Pi j} t_{TK\Pi j};$$

$$t_{TK\Pi j} = k_{a_u} (t_{\Pi P} + t_{OO} + t_{\Pi} + t_{3\Pi} + t_{\Pi K} + t_{ГД} + t_{OШ});$$

$$t_{\Pi P} = t_{\Pi P_{\text{нач}}} + \sum_{u=1}^{u=n} t_{\Pi P_u} + t_{\Pi P_{\text{кон}}};$$

$$t_{OO} = t_{OO_{\text{нач}}} + \sum_{u=1}^{u=n_1} k_{a_u} t_{OO_u} + t_{OO_{\text{кон}}};$$

$$t_{\Pi} = \sum_{u=1}^{u=n_2} k_{a_u} \left( \frac{Z_{\Pi}}{V_{\Pi}} + \frac{S}{V_S} + \frac{Z_{O\Pi}}{V_{O\Pi}} \right);$$

$$t_{3\Pi} = \sum_{u=1}^{u=n_3} k_{a_u} t_{3\Pi_u};$$

$$t_{ГД} = \sum_{u=1}^{u=n_4} k_{a_m} t_m = \sum_{u=1}^{u=n_4} k_{a_u} \left( \frac{L_{III}}{V} \right);$$

$$t_{\Pi K} = \sum_{u=1}^{u=n_5} k_{a_u} t_{\Pi K_u} = \sum_{u=1}^{u=n_5} k_{a_u} \left( \frac{L_{III}}{V_0} \right);$$

$$t_{OШ} = \sum_{u=1}^{u=n_6} k_{a_m} t_{om_u} = \sum_{u=1}^{u=n_6} k_{a_u} \left( \frac{L_{III}}{V_{оч}} \right);$$

где  $T_{O\Pi}$ ,  $T_{\Pi}$  – продолжительность выполнения операции и технологического процесса в целом;

$i, j, u$  – порядковые номера операций в технологическом процессе, технологических комплексов приемов (ТКП) в операции и приемов в ТКП;

$m, m1$  – полное количество операций в технологическом процессе и ТКП в операции;

$n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$  – количества повторений одноименных приемов в ТКП;

$t_{\text{ТКП}}, t_{\text{ПР}}, t_{\text{ОО}}, t_{\text{П}}, t_{\text{ЗП}}, t_{\text{ПК}}, t_{\text{ГД}}, t_{\text{ОШ}}$  – соответственно продолжительность выполнения ТКП, а также приемов принятия решений, подготовки, откладывания и смены оборудования и инструмента, переходов рабочих и перемещения оборудования, занятия рабочим положения для выполнения ТКП, подготовки кромок конструкции к сварке, горения электрической дуги, очистки сварного шва от шлака;

$t_{\text{ПР}_{\text{НАЧ}}}, t_{\text{ПР}_{\text{КОН}}}, t_{\text{ОО}_{\text{НАЧ}}}, t_{\text{ОО}_{\text{КОН}}}$  – соответственно продолжительность принятия решений, подготовки, откладывания и смены оборудования и инструмента перед началом и после окончания ТКП;

$Z_{\text{П}}, V_{\text{П}}, Z_{\text{ОП}}, V_{\text{ОП}}, S, V_S$  – соответственно высота и средняя скорость подъема, высота и средняя скорость опускания, расстояние и средняя скорость перемещения;

$L_{\text{Ш}}, V, V_o, V_{oc}$  – соответственно длина сварного шва, средняя скорость сварки, осмотра и очистки кромок сопряжения, очистки сварного шва;

$k_a$  – коэффициенты совмещения работ во времени.

Вышеприведенная модель и имеющиеся данные по энерготратам исполнителей работ [2] стали базой для разработки обобщенной математической модели исследуемых процессов по второму критерию эффективности – энерготратам исполнителей. Эта модель будет иметь следующий вид:

$$E_{\text{П}} = \sum_{i=1}^{i=m} E_{\text{ОП}i};$$

$$E_{\text{ОП}i} = \sum_{j=1}^{j=m} E_{\text{ТКП}j};$$

$$E_{\text{ТКП}j} = e_{\text{ПР}} + e_{\text{ОО}} + e_{\text{П}} + e_{\text{ЗП}} + e_{\text{ПК}} + e_{\text{ГД}} + e_{\text{ОШ}};$$

$$e_{\text{ПР}} = \mathcal{E}_{\text{НПР}} t_{\text{ПР}};$$

$$e_{\text{ОО}} = (\mathcal{E}_{\text{Т}} + \mathcal{E}_{\text{Н}})_{\text{ОО}} t_{\text{ОО}}^*;$$

$$e_{\text{П}} = (\mathcal{E}_{\text{Т}} + \mathcal{E}_{\text{П}})_{\text{П}} t_{\text{П}}^*;$$

$$e_{\text{ЗП}} = \mathcal{E}_{\text{НЗП}} t_{\text{ЗП}}^*;$$

$$e_{\text{ПК}} = (\mathcal{E}_{\text{Т}} + \mathcal{E}_{\text{Н}})_{\text{ПК}} t_{\text{ПК}}^*;$$

$$e_{\text{ОШ}} = (\mathcal{E}_{\text{Т}} + \mathcal{E}_{\text{Н}})_{\text{ОШ}} t_{\text{ОШ}}^*;$$

$$e_{\text{ГД}} = (\mathcal{E}_{\text{Т}} + \mathcal{E}_{\text{Н}})_{\text{ГД}} t_{\text{ГД}}^*;$$

где  $E_{\text{ТКП}j}$  – энерготраты исполнителей работ при выполнении j-го ТКП;

$E_{\text{ОП}i}$  – энерготраты исполнителей работ при выполнении i-й операции;

$e_{\text{ПР}}, e_{\text{ОО}}, e_{\text{П}}, e_{\text{ЗП}}, e_{\text{ПК}}, e_{\text{ГД}}, e_{\text{ОШ}}$  – энерготраты исполнителей работ при выполнении типовых приемов;

$\mathcal{E}_{\text{Н}}$  – расход энергии в минуту в зависимости от положения тела исполнителя;

$\mathcal{E}_{\text{Т}}$  – расход энергии в минуту в зависимости от рода (тяжести) работы;

$\mathcal{E}_П$  – расход энергии в минуту при ходьбе в различных условиях;

$t_{ПР}^*, t_{ОО}^*, t_{П}^*, t_{ЗП}^*, t_{ПК}^*, t_{ГД}^*, t_{ОШ}^*$  – продолжительность выполнения типовых приемов без учета совмещения работ во времени.

### Выводы

Таким образом, в соответствии с установленными показателями эффективности процессов изготовления и монтажа элементов судовых трубопроводов были разработаны обобщённые математические модели этих процессов по критерию продолжительности времени и критерию энерготрат исполнителей. Данные исследования могут быть учтены как при проектировании трубопроводных цехов, так и при их модернизации.

### Список литературы

1. Панов Р.А. Создание модели трубопровода, расчет и генерации продольного профиля и плана трассы трубопровода // Вестник ТГАСУ. – 2004. – № 1. – С. 154-162.
2. Сахно К.Н. Научные основы повышения технологичности трубопроводов судовых систем на стадии проектирования: дисс. ... д-ра техн. наук; специальность: 05.08.04 технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства. – Астрахань: АГТУ, 2012. – 353 с.
3. Иванов А.П. К вопросу повышения производительности труда судосборщиков на секционные сборки // Вопросы судостроения. Сер. Технология судостроения. – Вып. 24. – Л.: Судостроение, 1978. – С. 30-36.
4. Иванов А.П. Оптимизация судосборочных операций на базе математического моделирования // IX Отраслевое совещание по механизации тяжелых и трудоемких работ в судостроении. НТО имени акад. А.Н. Крылова: тез. докл. – Л.: Судостроение, 1980. – С. 72-74.
5. Овчинников И.Н. Судовые системы и трубопроводы (устройство, изготовление и монтаж). – Л.: Судостроение, 1971. – 296 с.

### Сведения об авторах:

*Сахно Константин Николаевич* – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой, «Судостроение и энергетические комплексы морской техники», АГТУ, г.Астрахань;

*Конева Светлана Андреевна* – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Судовое электрооборудование», СевГУ, г.Севастополь;

*Цалоев Владимир Муратович* – доцент, СевГУ, г.Севастополь.