

УДК 621.002:629.12+621.79

DOI: 10.37890/jwt.vi79.476

## **Математическая модель поточного изготовления секций в гибкой производственной системе верфи**

**О.А. Щеголева<sup>1</sup>**

*ORCID: 0009-0001-5341-8799*

**А.Е. Бурмистрова<sup>2</sup>**

*ORCID: 0000-0002-9373-4323*

**Е.Г. Бурмистров<sup>2</sup>**

*ORCID: 0000-0003-0385-0847*

<sup>1</sup> Самарский филиал Волжского государственного университета водного транспорта, г. Самара, Россия

<sup>2</sup> Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

**Аннотация:** Сборочно-сварочное производство верфи является сложной производственной системой. Изучение функционирования отдельных её элементов, взаимосвязей между ними, откликов на возмущающие воздействия внешних и внутренних факторов в реальных условиях сложно, дорого, долго. Для этой цели уместно использовать всевозможные методы моделирования, особенно если речь идёт о моделировании систем с потоковыми процессами. Применение такой практики позволит без значительных затрат различного рода ресурсов, в короткие сроки найти оптимальное планировочное решение по составу и производительности оборудования, расстановке персонала и проч. Большинство методов моделирования в своей основе имеют предварительно разработанную математическую модель. Цель её разработки в контексте данной статьи сведена к поиску рациональных решений, связанных с повышением гибкости существующих производственных процессов и управления ими.

**Ключевые слова:** математическая модель; гибкое производство, производственная система, алгоритм управления моделью.

## **Mathematical model of in-line manufacturing of sections in a flexible shipyard production system**

**Olga A. Shchegoleva<sup>1</sup>**

*ORCID: 0009-0001-5341-8799*

**Anastasia E. Burmistrova<sup>2</sup>**

*ORCID: 0000-0002-9373-4323*

**Evgeny G. Burmistrov<sup>2</sup>**

*ORCID: 0000-0003-0385-0847*

<sup>1</sup> Samara Branch of the Volga State University of Water Transport, Samara, Russia

<sup>2</sup> Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract:** The assembly and welding production of the shipyard is a complex production system. Studying the functioning of its individual elements, the interrelationships between them, and responses to the disturbing effects of external and internal factors in real conditions is difficult, expensive, and time-consuming. For this purpose, it is appropriate to use all possible modeling methods, especially when it comes to modeling systems with streaming processes. The application of this practice will allow, without significant expenditure of various kinds of resources, in a short time to find the optimal planning solution for the composition and performance of equipment, the placement of personnel, etc. Most modeling methods are based on a pre-developed mathematical model. The purpose of its development

in the context of this article is connected with the search for rational solutions related to increasing the flexibility of existing production processes and their management.

**Keywords:** mathematical model; flexible production, production system, model management algorithm.

### **Введение**

Разработка и внедрение на верфях эффективных методов исследования характеристик сложных производственных систем (ПС) является важной задачей научного обеспечения отечественного судостроения. Сборочно-сварочное производство в полной мере является такой системой, в которой, к тому же реализованы принципы поточного производства [1]. Поэтому общую цель разработки математической модели соответствующей комплексно-механизированной ПС для изготовления секций поточным методом можно свести к поиску оптимальных (рациональных) решений в части повышения технического уровня существующих технологических процессов и повышения уровня автоматизации управления ими. Задача будет сводиться к алгоритмизации и математической формализации оптимальных взаимосвязей между позициями потока и отдельными рабочими местами с учётом численности и квалификации персонала, количества и состояния средств технологического обеспечения (СТО).

Требуемую формализацию можно обеспечить с помощью:

- механизации наиболее сложных и трудоёмких работ и специализации рабочих мест;
- применения законов логистики при управлении процессами;
- повышения коэффициента загрузки оборудования;
- повышения коэффициента использования персонала;
- снижения номенклатуры применяемых СТО;
- сокращения продолжительности производственного цикла.

Математическое описание сложной ПС включает в себя составление соответствующего алгоритма и его формализацию. Основной *целью* при этом является разработка алгоритмического представления объекта моделирования, а *задачей* – формальное представление логико-математической модели ПС [2]. Таким образом станет возможным уже на ранних этапах подготовки производства к поточному выпуску секций выполнить всесторонний анализ характеристик ПС, входящих в неё подсистем, их взаимосвязей между собой. В свою очередь, это позволит рассмотреть и оценить нескольких альтернативных вариантов моделей ПС, повысить качество окончательно выбранного варианта.

### **Материалы и методы**

Известно, что любая модель предполагает наличие инструментов воздействия на входные и выходные параметры моделируемого объекта для их варьирования в заданном диапазоне. То есть, изначально должна быть создана базовая модель, с помощью которой можно задавать повторяющиеся с новыми входными воздействиями альтернативные варианты (процессы)  $\zeta_x(\tau)$ . Специфичность состоит в том, что «отрезки» процесса между точками регенерации являются вероятностными клонами друг друга. Это позволит получать независимые оценки каждого альтернативного варианта процесса на каждом отрезке регенерации [3-6] и оценка целевой функции вычислится с любой заданной степенью точности.

$$L = \frac{\xi}{\Delta T} ; \xi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i ; \Delta T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta T_i ,$$

где  $\xi_i = \int_{T_{i-1}}^{T_i} \zeta(\tau) dt$  – интегральная оценка исследуемого процесса;

$N$  – число циклов регенерации;  $\Delta T = T_i - T_{i-1}$  – длительность  $i$ -го цикла регенерации.

Учитывая, что на сегодня отсутствуют универсальные способы генерации моделей, для решения поставленных в данном исследовании задач можно применить принципы направленного управляемого эксперимента. То есть, взаимосвязь каждой исследуемой характеристики с каким-либо показателем устанавливать аналитически, а для оценки этого показателя использовать методы имитации. Общую структуру последовательности разработки модели таким способом можно представить схемой на рис. 1 [7].



Рис. 1. Последовательность разработки модели с использованием метода управляемых экспериментов

Для сокращения вычислительного ресурса при разработке модели удобно применить равномерную сетку пространства и управляемых параметров  $XX^C \in XX$ . Задачей останется выбор:

$$X = \text{arc max } L(X), \quad X \in XX^C, \quad \text{где } L(X) = M\zeta_X.$$

### Результаты

Для решения задачи построим алгоритм, уточняющий значения оценок  $L(X)$  в точках сетки  $XX^C$ . Алгоритм управления такой моделью приведён на рис. 2.

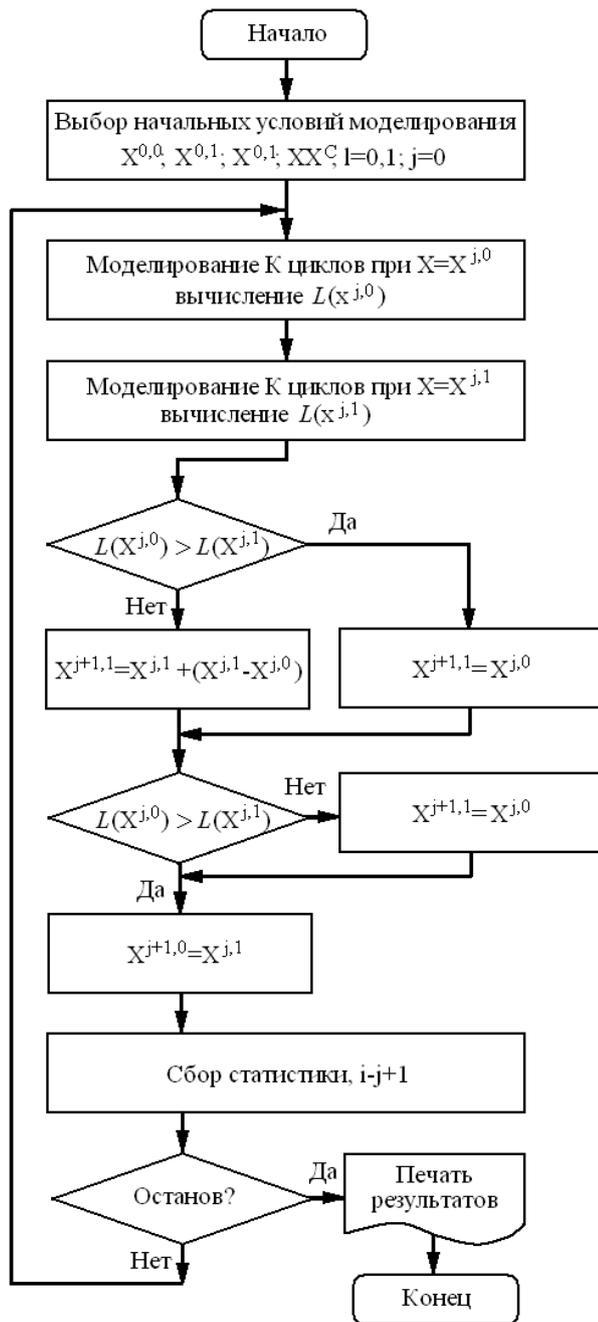


Рис. 2. Блок-схема управления математической моделью

Каждый  $j$ -й цикл алгоритма определяет пару соседних значений управляемого параметра  $X^{j,l}$ ;  $l=0,1$ . Для каждой из них, на основании  $K$  циклов регенерации

$$\xi(x^{j,l}) = \int_{t(2j+l)k_i}^{t(2j+l+1)k} \xi_{x^{j,l}}(\tau) dt$$

где  $\xi_{x^{j,l}}(\tau)$  – выборочная траектория процесса  $\zeta_{x^{j,l}}(\tau)$ ;  $\tau_j$  – моменты регенерации модели,  $\Delta T(X^{j,l})=t(2j+l+1)k-(2j+l)k$ , рассчитывается целевая функция  $L(X^{j,l})$ :

$$L(X^{j,l}) = \zeta(X^{j,l}) / \Delta T(X^{j,l}).$$

В процессе моделирования для всех точек  $X \in XX_i^c$  накапливаются величины  $\xi^0(X_i)$  и  $\Delta T(X_i)$ :

$$\begin{aligned} \xi^0(X_i) &= \sum_{j,l: X^{j,l}=X_i} \xi(X^{j,l}) \\ \Delta T^0(X_i) &= \sum_{j,l: X^{j,l}=X_i} \Delta T(X^{j,l}). \end{aligned} \tag{1}$$

Такой алгоритм позволяет вычислять общие оценки целевой функции сразу для всех значений  $X \in XX_i^c$ :

$$L(X_i) = \frac{\xi^0(X_i)}{\Delta T(X_i)}$$

Точность оценок зависит от количества циклов регенерации [3-6].

С учётом изложенного, на рис. 3 представлена концептуальная схема математической модели гибкой ПС поточного изготовления секций во взаимосвязи с корпусозаготовительным и корпусостроительным производствами верфи. Выходящие и входящие параметры этих производств для данной модели являются соответственно входными и выходными параметрами.

Из работы [7] следует, что выбор оптимального варианта модели необходимо осуществлять с учётом заданных: производственного цикла изготовления комплекта секций  $Ц$ , такта выпуска сборочных единиц (СЕ)  $t$ , ритма работы производственных участков  $P$ . Общая последовательность действий по выбору оптимального варианта приведена на рис. 3.

### Обсуждение

В порядке обсуждения можно предположить, что в процессе «проигрывания» модели в ней будут накапливаться величины  $\bar{\zeta}^0(X_i)$  и  $\Delta T(X_i)$  для всех точек сетки  $X \in XX_i^c$ , где

$$\bar{\zeta}^0(X_i) = \sum_{j,l: X^{j,l}=X_i} \bar{\zeta}(X^{j,l}), \Delta T^0(X_i) = \sum_{j,l: X^{j,l}=X_i} \Delta T^0(X^{j,l}).$$

С учётом (2) по окончании моделирования можно вычислить целевую функцию для всех значений  $X \in XX_i^c$ :

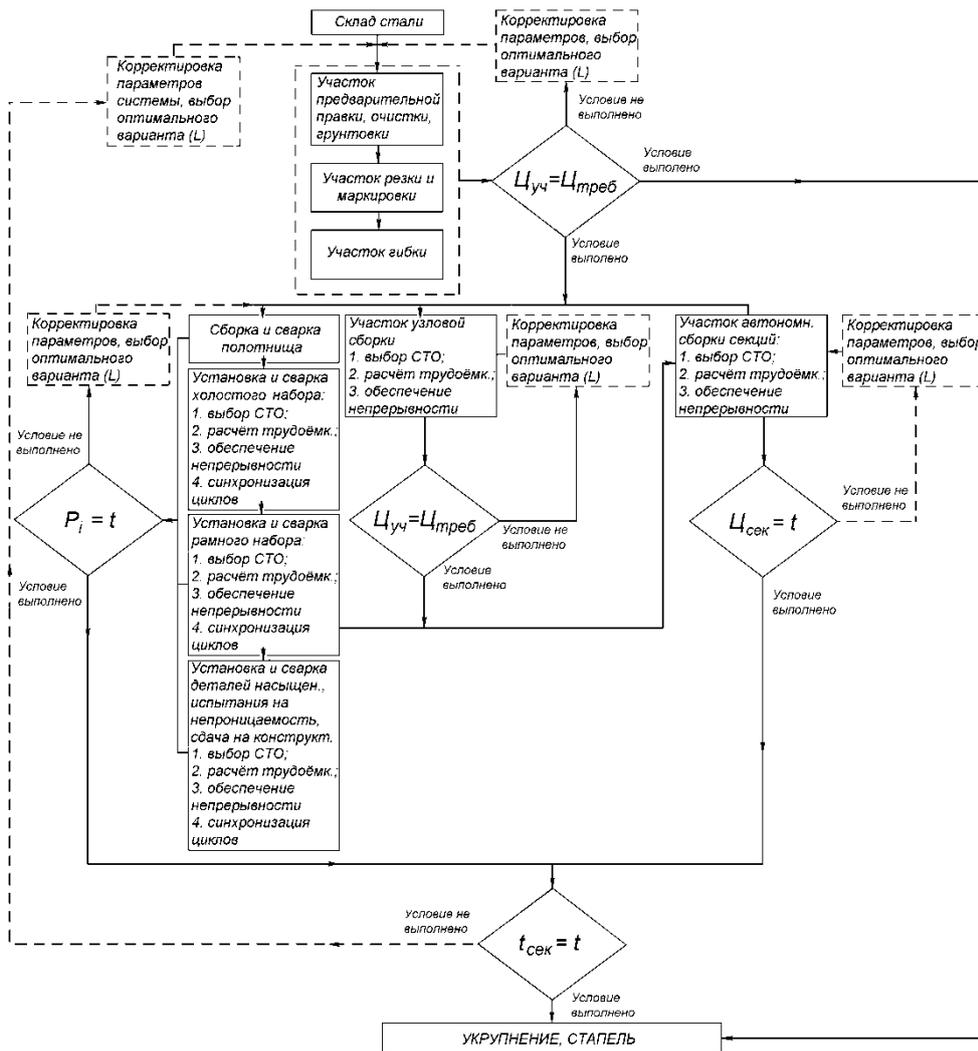


Рис. 3. Алгоритм математической модели изготовления секций

Соответствие оценок определяется числом циклов регенерации, при которых модель соответствует значениям управляемых параметров на  $j$ -ом интервале управления

Хотя  $\eta^{j,I}; I = 0, 1, \dots$  не является марковской последовательностью, но её вектор

$$\bar{Y}(X_i) = \frac{\bar{\xi}^0(X_i)}{\Delta T(X_i)}; \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{matrix} \eta^{0,0} \\ \eta^{0,1} \end{matrix} \right\}, \left\{ \begin{matrix} \eta^{1,0} \\ \eta^{1,1} \end{matrix} \right\}, \dots, \left\{ \begin{matrix} \eta^{j,0} \\ \eta^{j,1} \end{matrix} \right\}, \dots$$

является классической марковской цепью. Тогда:

$$C = \{C^+\}_{j=0}^{I-1} V \{C_i^-\}_{i=1}^I, C_i^+ = (X_i, X_{i+1}), \overline{i = 0, I-1}$$

$$C_i^- = (X_i, X_{i-1}), \overline{i = 1, I}$$

где  $C$  – множество состояний марковской цепи.

Дальнейшие действия зависят от конкретного состояния цепи  $C_i^+ (C_i^-)$ . Вероятности состояний цепи и переходы между ними могут быть определены соотношениями:

$$P_i^+ = P \{ \overline{Y}(X_i) > \overline{Y}(X_{i-1}) \} \quad i = \overline{1, I},$$

$$P_i^- = P \{ \overline{Y}(X_{i+1}) > \overline{Y}(X_i) \} \quad i = \overline{1, I-1},$$

$$q_i^+ = I - P_i^+; \quad q_i^- = I - P_i^-.$$

Стационарные вероятности состояний будут определяться равенством:

$$\pi_{i,I} = P_{ST}(C_{i-1}^+) \pi_{i,1} = P_{ST}(C_{i+1}^-),$$

вектор-строка стационарных вероятностей:

$$\overline{\pi} = (\pi_{0,2}, \pi_{1,1}, \pi_{1,2}, \dots, \pi_{I-1,2}, \pi_{i,1}),$$

а её составляющие удовлетворяют:

$$\overline{\pi} = \overline{\pi} p;$$

$$\sum_i \sum_j \pi_{ij} = 1.$$

Расчёт  $\pi$  лучше вести определяя значения  $\pi_{ij}$  через  $\pi_{0,2}$ . Если обозначить  $\pi_0 = \pi_{ij}$ , то:

$$\pi_0 = \pi_{1,1} \cdot q_i^+ + \pi_{1,2} \cdot q_i^-; \quad \pi_{1,1} = \pi_0 \cdot 1.$$

Выражая из этих уравнений  $\pi_{1,1}$  и  $\pi_{1,2}$ , получим:

$$\pi_{1,1} = \pi_0 \cdot 1,$$

$$\pi_{1,2} = \pi(\pi_0 - \pi \cdot q_1^+ \setminus q_1^- = \pi_0 \cdot p_i^- \setminus q_i^-).$$

Утверждение выполняется для  $i=1$  и 2. Применив метод индукции для остальных значений (при  $i>2$ ) получим:

$$\pi_{i,1} = \pi_0 \cdot \prod_{k=1}^{i-1} \frac{p_k^+}{q_k^-}, \quad i = \overline{2, I-1},$$

$$\pi_{i,2} = \pi_0 \cdot \prod_{k=1}^i \frac{p_k^+}{q_k^-}, \quad i = \overline{2, I-1}.$$

Решая уравнения

$$\pi_{n,2} = \pi_{n+1,1} \cdot q_{n+1}^+ + \pi_{n+1,2} \cdot q_{n-1}^-;$$

$$\pi_{n+1,1} = \pi_{n,1} \cdot p_n^+ + \pi_{n,2} \cdot p_n^-$$

относительно  $\pi_{n+1,1}$  и  $\pi_{n+1,2}$  и подставляя значения  $\pi_{n,1}, \pi_{n,2}$ , получим:

$$\begin{aligned} \pi_{i+1,1} &= \left( \prod_{k=1}^{n-1} \frac{p_k^+}{q_k^-} p_n^+ + p_n^- \prod_{k=1}^n \frac{p_k^+}{q_k^-} \right) \cdot \pi_0 = \\ &= \pi_0 \left( p_n^+ + \frac{p_n^-}{q_n^-} \right) \cdot \prod_{k=1}^{n-1} \frac{p_k^+}{q_k^-} = \pi_0 \cdot \prod_{k=1}^n \frac{p_k^+}{q_k^-} \\ \pi_{i+1,2} &= \frac{\pi_0 \left( \prod_{k=1}^n \frac{p_k^+}{q_k^-} p_n^+ - q_{n+1}^- \prod_{k=1}^n \frac{p_k^+}{q_k^-} \right)}{q_{n+1}^-} = \\ &= \pi_0 \cdot \prod_{k=1}^{n-1} \frac{p_k^+}{q_k^-} \cdot \frac{1 - q_{n+1}^+}{q_{n+1}^-} = \pi_0 \cdot \prod_{k=1}^{n+1} \frac{p_k^+}{q_k^-}. \end{aligned} \tag{4}$$

Получим  $\pi_{1,1} = \pi_{l-1,2}$  и  $\pi_0 = \frac{1}{2} \left( 1 + \sum_{j=2}^{l-1} \prod_{k=1}^{j-1} \frac{p_k^+}{q_k^-} \right)^{-1}$ .

То есть, решение системы (4) будет для случая  $\sum_{j=1}^l \prod_{k=1}^{j-1} \frac{p_k^+}{q_k^-} < \infty$ , когда

последнее преобразование для стационарных вероятностей характеристик управляемой модели можно записать в виде [3-6, 8, 9]:

$$\begin{aligned} \pi_{0,2} = \pi_{1,1} = \pi_0 &= \frac{1}{2 \left( 1 + \sum_{j=2}^l \prod_{k=1}^{j-1} \frac{p_k^+}{q_k^-} \right)} \\ \pi_{j+1,1} = \pi_{i,2} &= \frac{\prod_{k=1}^i \frac{p_k^+}{q_k^-}}{2 \left( 1 + \sum_{j=2}^l \prod_{k=1}^{j-1} \frac{p_k^+}{q_k^-} \right)^{-1}}. \end{aligned}$$

### Заключение

С применением описанной математической модели возможно выявление ряда вариантов для конкретного производственного участка. Эффективность использования того или иного варианта будет определяться задаваемой производственной программой, уровнем механизации, формой организации труда. Возможность разделения производственного процесса на технологические комплексы из технологически однородных операций делает реальной перспективу комплексной механизации участка (вначале точечная механизация только наиболее трудоёмких

работ) и обеспечит системный подход к повышению технического уровня производства в целом.

Кроме того, важно отметить, что разработанная математическая модель позволяет учитывать и факт того, что большая часть используемых в сборочно-сварочных цехах верфей средств технологического обеспечения (СТО) проектировалась с учётом: различий в типах изготавливаемых СЕ их большой номенклатуры, значительной массы и высоких требования к точности изготовления, минимизации сроков сборки и сварки секций в общем цикле корпусостроительных работ, сложности синхронизации работ в цехе (цехах). То есть, позволяет учитывать разницу в объёмах работ, выполняемых с помощью тех или иных СТО, и различия в длительности циклов этих работ.

Отмеченные факты указывают на то, что для вариантов моделей производственного участка конструктивна идея создания и 3D-модели СТО. Как следует из работ [10, 11], это позволит проектировать ПС на качественно новом уровне, синхронизировать все этапы проектирования, настроить логистические взаимосвязи между существующими СТО и вновь проектируемыми, включить новые СТО в существующий производственный поток, адаптировать эргономику проектируемых СТО к конкретным производственным условиям, оптимизировать производственные характеристики СТО, спланировать проектирование СТО с учётом особенностей организации производства и т.п.

#### **Благодарности**

Авторы выражают благодарность за предоставленный для подготовки данной статьи материал и ценные замечания при подготовке статьи:

- 1) начальнику Центра разработки Правил Верхне-Волжского филиала ФАУ «Российское классификационное общество» – к.т.н., Д.А. Галочкину;
- 2) главному технологу ПАО «Завод «Красное Сормово» – А.Н. Ботманову.

#### **Список литературы**

1. Корсаков, В.С. Основы конструирования приспособлений: учеб. для вузов – 2-е изд., пераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 277 с.
2. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. Москва: Наука, 1972. – 830 с.
3. Фрейдина, Е.В. Исследование систем управления: учебное пособие / Е.В. Фрейдина. – М.: Омега, 2008. – 367 с.
4. Собер, Дж. Линейный регрессионный анализ / Дж. Собер: Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 340 с.
5. Ашманов, С.А. Линейное программирование: учебное пособие для ВУЗов / С. А. Ашманов. – М.: Наука, 1981. – 304 с.
6. Денисов, А.А. Теория больших систем управления / А. А. Денисов, Д. Н. Колесников. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 288 с.
7. Галочкин, Д.А., Бурмистров Е.Г. Применение метода имитационного моделирования при подготовке сборочно-сварочного производства судостроительной верфи: монография – Н. Новгород : Типография ООО «Мастер-плюс», 2013. – 151 с.
8. Карлин, С. Основы теории случайных процессов / С. Карлин: Пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 308 с.
9. Советов, Б.Я. Моделирование систем: учеб. для вузов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
10. Галочкин Д.А., Огнев Н.В., Бурмистров Е.Г. Разработка программ поддержки систем 3-D моделирования элементов производственных систем верфи // «Вестник ВГАВТ» выпуск 28, Н. Новгород, 2010. – С. 62 – 64.
11. Галочкин, Д.А., Н.В. Огнев, Е.Г. Бурмистров Организация потоковых процессов и разработка средств механизации основных производств верфи с использованием методов имитационного моделирования и законов производственной логистики // Судостроение. – 2013. – №2. – С.49-53.

#### **References**

1. Korsakov V. Fundamentals of fixture design: textbook for universities/ 2nd ed., editorial and ext. M.: Mashinostroenie, 1983. 277 p.
2. Korn G. Reference book on mathematics for scientists and engineers / G. Korn, T. Korn. Moscow: Nauka, 1972. 830p.
3. Freidina, E. Research of the control systems: textbook / E. Freidina. Moscow: Omega, 2008. 367 p.
4. Sober J. Linear regression analysis / J. Sober: Per. from Engl. - M.: Mir, 1980. - 340 c.
5. Ashmanov S. Linear programming: a textbook for universities / S.A. Ashmanov. Moscow: Nauka, 1981. 304 p.
6. Denisov A. Theory of the large control systems / A.A. Denisov, D.N. Kolesnikov. L.: Energoizdat, 1982. 288 p.
7. Galochkin D.; Burmistrov E. Application of the simulation modeling method in preparation of assembly and welding production of a shipyard : a monograph. N. Novgorod : Printing house "Master-plus", 2013. 151 p.
8. Carlin, S. Fundamentals of the theory of random processes. S. Carlin: Per. from Engl. M.: Mir, 1971. 308 p.
9. Sovetov, B.Ya. Modeling of systems: textbook for universities. B.Ya. Sovetov, S. Yakovlev. 3rd ed., revision and supplement. M.: Vyssh. shk., 2001. 343 p.
10. Galochkin D., Ognev N., Burmistrov E. Development of support programs for 3-D modeling systems of the shipyard production systems elements. "Vestnik VGAVT" issue 28, N. Novgorod, 2010. P. 62-64.
11. Galochkin D., Ognev N., Burmistrov E/ Organization of flow processes and development of means of mechanization of the main shipyard production using the methods of simulation modeling and laws of production logistics. Shipbuilding. 2013. №2. P. 49-53.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Щеголева Ольга Анатольевна**, аспирант Самарский филиал Волжского государственного университета водного транспорта (СФ ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 443036, Российская Федерация, Самара, ул. Неверова, 87, e-mail: shh151@mail.ru

**Бурмистрова Анастасия Евгеньевна**, магистрант, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: sovvesna@yandex.ru

**Бурмистров Евгений Геннадьевич**, д.т.н., профессор, профессор кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: burmistrov\_e\_g@mail.ru

**Olga A. Shchegoleva**, postgraduate student Samara branch of the Volga State University of Water Transport (SF FGBOU VO "VGUVT"), 443036, Russian Federation, Samara, 87 Neverova str., e-mail: shh151@mail.ru

**Anastasia E. Burmistrova**, Master's student, Volga State University of Water Transport (VSUVT), 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: sovvesna@yandex.ru

**Evenly G. Burmistrov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Design and Technology of Ship Construction, Volga State University of Water Transport (VSUVT), 5 Nesterova str., Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: burmistrov\_e\_g@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.03.2024; опубликована онлайн 20.06.2024.  
Received 27.03.2024; published online 20.06.2024.