

УДК 629.5.081.326

doi:10.20998/2413-4295.2020.03.06

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИРОБНИЧОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛОСКОЇ СЕКЦІЇ ПОНТОНА КОМПОЗИТНОГО ДОКУ

Ю. К. ЯГЛИЦЬКИЙ*, К. В. КИРИЧЕНКО

кафедра суднобудування та ремонту суден, Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, УКРАЇНА

*e-mail: yahlytskyiyurii@gmail.com,

АНОТАЦІЯ Проведено огляд відомих технічних рішень у докобудуванні, що спрямовані на забезпечення необхідних виробничих параметрів при виготовленні залізобетонного понтона композитного доку. Встановлено, що у наявних рішеннях не встановлено зв'язок з параметрами виробничого процесу та відсутній вплив зміни цих параметрів на значення фондоконцентрації. Розроблено модель виробничого процесу виготовлення плоскої секції понтона доку, що дає змогу відпрацьовувати на ній керуючі дії, що знижують ймовірність проявів ризиків при виготовленні корпусу доку. За допомогою розробленої моделі можна оцінювати зниження як неефективних витрат ресурсів за рахунок управління ризиками виробничого процесу, так і скорочення нормативних витрат ресурсів внаслідок реалізації заходів щодо вдосконалення організації виробництва. Для розробки математичної моделі виробничого процесу виготовлення плоскої секції понтона доку формалізовано вимоги, що обумовлюють виконання виробничої програми підприємства при забезпеченні умов мінімізації витрат ресурсів у вигляді системи рівнянь. У результаті проведеного дослідження докобудівного виробництва виділено шість основних типів ресурсів, витрати яких впливають на формування фондоконцентрації вироблених плоских секцій понтона доку – метал, бетон, вода, електроенергія, персонал і час. Проведено комплексну оцінку фондоконцентрації виробничого процесу за рахунок сукупного функціоналу втрат при умові, що його мінімальне значення відповідає мінімальній фондоконцентрації виробничого процесу. Розроблено структуру запропонованої моделі з використанням методології Integration Definition for Function Modeling, а перевірка моделі на ідентичність проводилася шляхом зіставлення результатів моделювання при значенні результуючих параметрів, що відповідають реальним значенням чинного докобудівного виробництва. З використанням розробленої моделі проведено дослідження впливу різних організаційно-технічних заходів на фондоконцентрацію виробничого процесу та зроблена оцінка керуючих впливів на витрати ресурсів у виробничому процесі.

Ключові слова: понтон; композитний плавучий док; залізобетонна плита; плоска секція понтона доку; фондоконцентрація; математична модель виробничого процесу

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR THE WORKFLOW OF MANUFACTURING OF A FLAT SECTION OF A COMPOSITE DOCK PONTOON

Yu. YAHLYTSKYI, K. KYRYCHENKO

Department of Shipbuilding and Ship Repair Kherson branch of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, UKRAINE

ABSTRACT The article reviews technical solutions in dock construction that are aimed at providing the parameters necessary for the manufacture of reinforced concrete pontoon of a composite dock. It is revealed that these solutions do not account for the workflow parameters; moreover, changing these parameters does not influence fund concentration. A model has been developed for the workflow of manufacturing of a flat section of a dock pontoon. It enables mastering control actions that reduce the probability of the risk manifestation in the manufacture of the dock body. The model can be applied to evaluate the reduction of inefficient resource usage by managing the workflow risks and decreasing the standard resource consumption through improvement of manufacture organization. Developing the mathematical model has been preceded by formalization of the requirements that establish the manufacture program of the enterprise while minimizing resource consumption in the form of a system of equations. A study of dock construction has been performed that helped identify six major types of resources the usage of which affects formation of fund concentration for the manufactured flat sections of dock pontoons. They are metal, concrete, water, electricity, personnel, and time. The article presents a comprehensive evaluation of the fund concentration of the workflow through total loss functionality, provided that its minimum value corresponds to the minimum fund concentration of the workflow. The structure of the proposed model has been developed using the Integration Definition for Function Modeling methodology. Verification of the model has been performed through comparing the modeling results at the values of the resulting parameters that correspond to the actual values of present-day dock construction. The developed model has been used to study the influence of various organizational and technical measures on the fund concentration of the workflow. The control actions affecting resource consumption over the workflow have also been evaluated.

Keywords: pontoon; composite floating dock; reinforced concrete slab; flat section of a dock pontoon; fund concentration; mathematical model of a workflow

Вступ

Розробка й впровадження нових високоефективних методів побудови доків є одним з

головних напрямків розвитку технології й організації докобудівного виробництва [1]. Композитний плавучий док – це складна багатofункціональна

інженерна споруда, на яку досить активно впливають умови експлуатації та процеси навколишнього середовища, аналіз яких показує, що у більшості випадків найбільшим навантаженням піддається залізобетонний понтон доку [2]. Тому покращення головних характеристик залізобетонного понтону за рахунок матеріалів, що використовуються для його побудови (бетон і арматурна сталь), нових конструктивних і технологічних рішень в сучасних умовах стають актуальними. Також необхідно вдосконалення складу об'єктів виробничих процесів (ВП) виготовлення понтону (нормативна документація, обладнання, пристосування) [3].

ВП виготовлення залізобетонного понтона доку, крім того, повинні бути ефективними – цього можна досягнути структурною оптимізацією процесу за узагальнюючими показниками техніко-економічної ефективності. Метою оптимізації є вибір з безлічі альтернативних варіантів таких рішень, що дозволяють економічно витратити матеріальні, енергетичні, трудові та інші ресурси підприємства.

З математичної точки зору завдання структурної оптимізації ВП представляє собою завдання багатокритеріальної оптимізації й зводиться до визначення раціонального варіанту. Визначений варіант повинен якнайкраще реалізувати вимоги до виробу, що виготовляється (критерії оптимізації) з врахуванням специфіки, що обумовлена конкретними виробничими умовами (система обмежень) [4]. Оптимальним ВП виготовлення конструкцій доку вважається той, коли він забезпечує виконання усіх умов, сформульованих на попередніх етапах життєвого циклу виробу, відповідає реальним виробничо-технічним умовам, а також екстремуму цільової функції.

У докобудуванні відомі різні технічні рішення, спрямовані на забезпечення потрібних технологічних та організаційних параметрів при виготовленні залізобетонного понтона композитного доку, однак не встановлено їхній взаємозв'язок із параметрами ВП і вплив зміни цих параметрів на значення фондоконцентрації. Крім того, серед відомих способів і підходів немає методично обґрунтованих алгоритмів оцінки фондоконцентрації ВП побудови понтона доку, що враховують різноманіття факторів, що впливають на нього, у тому числі випадкового характеру.

Розробка моделі ВП виготовлення плоскої секції понтона доку (ПСПД) дозволить на ній відпрацювати керуючі впливи, що знижують ймовірність прояву загроз при виготовленні корпусу доку. Модель повинна оцінювати зниження як неефективних витрат ресурсів за рахунок управління ризиками ВП, так і скорочення нормативів витрат ресурсів у наслідок реалізації заходів з удосконалення організації виробництва. Це означає, що завдання розробки математичної моделі оцінки й управління фондоконцентрацією ВП виготовлення ПСПД є актуальним.

Мета роботи

Мета роботи – розробка математичної моделі для оцінки та управління фондоконцентрацією ВП виготовлення плоскої секції понтона композитного доку з подальшим його удосконаленням.

Для досягнення поставленої мети необхідне рішення наступних завдань:

- розробити перелік параметрів і локальні функції витрат для ВП з урахуванням виокремлених типів ресурсів;
- розробити загальну структуру моделі ВП виготовлення ПСПД;
- з використанням розробленої моделі провести дослідження впливу різних організаційно-технічних заходів на фондоконцентрацію ВП і надати їм оцінку.
- перевірити модель на ідентичність шляхом зіставленням результатів моделювання з параметрами, що відповідають реальним значенням чинного докобудівного виробництва.

Виклад основного матеріалу

Як зазначено у дослідженні [5], створення конкурентоспроможних плавучих доків, що відповідають світовим вимогам якості, потребує, крім використання сучасних композитних матеріалів і застосування інноваційних технологій виробництва, також прогресивних технічних рішень. Авторами дослідження [6] наведені способи виготовлення простих коробчастих плавучих конструкцій понтонного типу, аналогічні доковим конструкціям, що розглядаються у статті, які відрізняються високою технологічністю, низькими витратами виробництва та простотою обслуговування.

Вибір оптимальних конструкцій доків повинен ґрунтуватися на обов'язковому врахуванні складних взаємозалежностей економічного характеру для знаходження найбільш оптимального рішення. Одним з найбільш поширених методів розв'язання таких багатокритеріальних задач є зведення багатокритеріальної задачі до однокритеріальної. У роботі [7] представлені дослідження на основі використання критеріїв вибору раціональної конструкції та врахування чинних нормативних вимог, що дали змогу розробити рекомендації щодо удосконалення конструкції та технології побудови композитного плавучого доку, однак не розглянуті фактори витрат ресурсів виробничих процесів. Авторами дослідження [8] проведено скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану плит залізобетонного понтона композитних плавучих доків та обґрунтовано зменшення металоемності композитного доку за рахунок зменшення кількості набору у понтоні, однак не розглянуто бетон і метал, як складові частини фондоконцентрації виробничого процесу виготовлення плоских секцій понтона доку.

Авторами дослідження [9] обговорюється вплив розташування поперечної перегородки і

ущільнювальної пластини в нижній частині сполучного мосту на міцність конструкції У роботі [10] досліджено суттєві особливості проектування та будівництва бетонних понтонів. У науковій праці [11] представлена нова конструкція плавучого понтона. Чисельні та натурні випробування моделі для дослідження гідродинамічних характеристик пришвартованого понтону у воді з обмеженою глибиною проведені у дослідженні [12].

Для мінімізації матеріальних і трудових ресурсів, а також тривалості будівництва різних плавучих споруд у докобудуванні необхідно раціоналізувати виробничий процес побудови конструкцій. Авторами роботи [13] представлено модель складних виробничих процесів, яка дозволяє досягти доцільної технології виробництва. Представлена модель може бути застосована при оптимізації будь-якого складного виробничого процесу. Подібним є дослідження [14], де представлено математичну модель процесу планування обладнання суднового комплексу, який розробляється на верфі. Наведено якісний опис обмежень і цілей, що лежать в основі представленої математичної моделі планування розробки обладнання суднового комплексу. Авторами дослідження [15] наведено складові раціональної комплексної підготовки суднобудівного виробництва, яка забезпечує готовність заводу до виконання програми будівництва із заданими техніко-економічними показниками в установлені строки.

Аналізуючи результати проведених досліджень, можна констатувати, що серед них немає математично обґрунтованих алгоритмів оцінки фондоконцентрації виробничого процесу побудови понтона доку, що відповідають особливостям докобудівного виробництва та враховують різноманіття факторів впливу на нього.

Проведений аналіз дає підстави стверджувати, що проведення дослідження, присвячене розробці математичної моделі виробничого процесу виготовлення плоскої секції понтона композитного доку є доцільним.

Розробка функціональних параметрів моделі ВП з побудовою загальної структури моделі

ВП на будь-якому промисловому підприємстві, у тому числі й у докобудуванні, повинні бути економічно ефективними, тому необхідною функцією конструкторсько-технологічної підготовки виробництва є структурна раціоналізація ВП за узагальнювальними показниками техніко-економічної ефективності. Метою її є вибір з безлічі альтернативних варіантів таких рішень, що дозволяють раціонально витратити матеріальні, енергетичні, трудові та інші ресурси підприємства. Критерії, що використовуються при структурній раціоналізації ВП, підрозділяються на дві групи, що відповідають двом основним принципам їхньої розробки – технічній та економічній доцільності.

Основними технічними критеріями є: максимальна фактична продуктивність, мінімальний штучний час, максимальний коефіцієнт технічного використання обладнання. До групи економічних критеріїв входять: мінімальні приведені витрати, мінімальна собівартість виготовлення виробу, максимальний прибуток або рентабельність.

Вибір ВП повинен ґрунтуватися на реальних виробничо-технічних умовах та обов'язковому врахуванні складних взаємозалежностей економічного характеру для знаходження найбільш оптимального рішення. Ця робота представляє великі труднощі, і її необхідно виконувати одночасно з пошуком теоретичних і практичних рішень на основі урахування досвіду будівництва та експлуатації доків, а також результатів експериментів у найбільш важких умовах докування.

Вимоги до економічно ефективної організації виробництва композитного доку обумовлені наступними тенденціями, що відповідають сучасним напрямкам розвитку й організації докобудівного виробництва з використанням інноваційних технологій:

- 1) *Постійне удосконалення конструкцій і технології виготовлення композитних доків;*
- 2) *Зниження фондоконцентрації;*
- 3) *Зниження виробничих ризиків;*
- 4) *Створення комплексної системи підготовки виробництва композитних доків.*

Сформульовані вимоги обумовлюють необхідність проведення оцінки чинного докобудівного виробництва. Техніко-економічне обґрунтування доцільності реалізації заходів щодо удосконалення організаційних і технічних умов повинно виконуватися з метою зниження фондоконцентрації та виробничих ризиків, а також вироблення стратегії розвитку та модернізації виробництва.

У докобудуванні відомі різні технічні рішення, спрямовані на забезпечення необхідних виробничих параметрів при виготовленні залізобетонного понтона композитного доку, проте не встановлений їх зв'язок з параметрами виробничого процесу і вплив зміни цих параметрів на значення фондоконцентрації. Крім того, серед відомих способів і підходів немає методично обґрунтованих алгоритмів оцінки фондоконцентрації виробничого процесу побудови понтона доку, що враховують різноманіття факторів, які впливають на нього, у тому числі випадкового характеру.

Розробка моделі ВП виготовлення ПСПД дає змогу на ній відпрацьовувати керуючі дії, які знижують ймовірність прояви ризиків при виготовленні корпусу доку. Плоска секція понтона доку є основою з'єднань, з яких складається днище доку.

ВП побудови ПСПД повинен бути орієнтований на застосування механізованих та

автоматизованих процесів при виконанні більшості робіт і включати:

- застосування модифікованого морозостійкого бетону на основі сульфатостійкого портландцементу з вітчизняними домішками виробленого на автоматизованому бетонному заводі;
- правку, чищення, різку арматурної сталі на автоматизованій лінії безвідходного розкрою;
- складання арматурних сіток і каркасів на спеціальних стендах;
- термовологу обробку залізобетонних секцій в автоматизованому режимі.
- зварювання арматурних сіток і каркасів на багатоконтактних зварювальних машинах;
- формування плоских залізобетонних секцій в універсальних металевих формах-матрицях;

Модель ВП повинна оцінювати зниження як неефективних витрат ресурсів за рахунок управління ризиками ВП, так і скорочення нормативних витрат ресурсів внаслідок реалізації заходів щодо вдосконалення організації виробництва.

Для розробки математичної моделі ВП виготовлення ПСПД необхідно формалізувати вимоги, які обумовлюють виконання виробничої програми підприємства при забезпеченні умов мінімізації витрат ресурсів у вигляді системи рівнянь. У докобудівному виробництві основними є 6 основних типів ресурсів (рис. 1), витрати яких впливають на формування фондоконцентрації вироблених ПСПД – це метал (арматурна сталь і сталевий прокат), високоміцний морозостійкий суднобудівний бетон, вода, електроенергія, персонал і час.

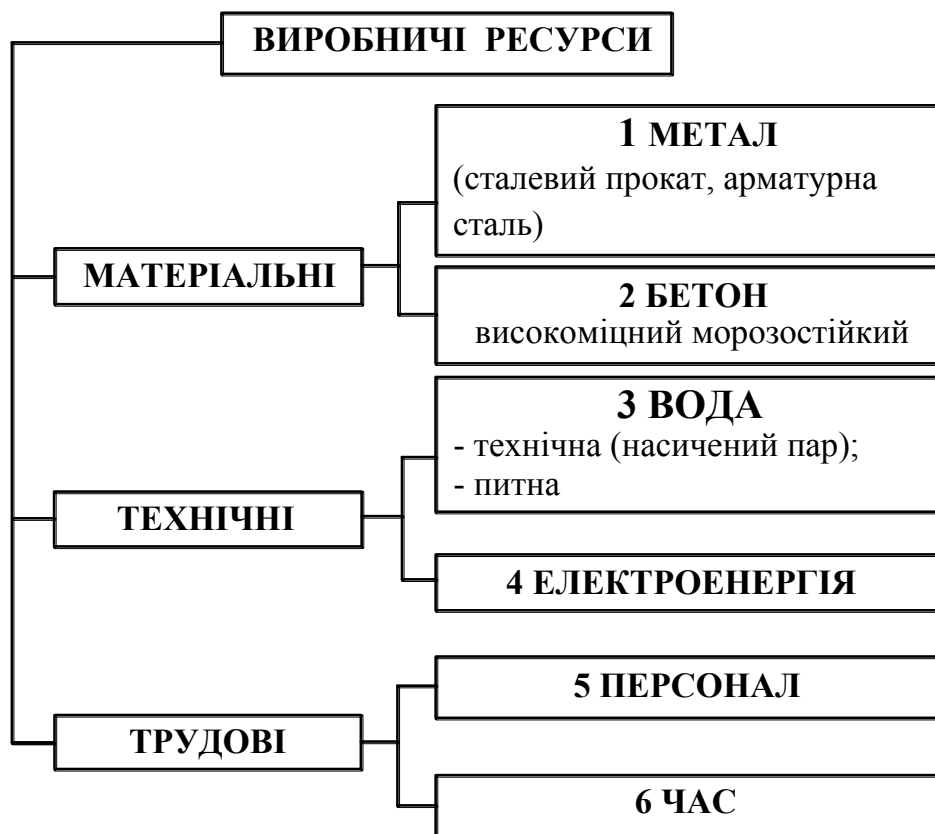


Рис. 1 – Структуризація основних типів ресурсів, витрати яких впливають на формування фондоконцентрації вироблених ПСПД

Сукупний план виробництва ПСПД визначається послідовністю планових значень $p^{план} = (p_1^{план}, \dots, p_n^{план})$, з урахуванням кожної з n одиниць планової номенклатури, де $p_n^{план}$ – планова кількість ПСПД n -ої позиції плану у партії, n – номер позиції з плану виробництва.

Вимоги виконання виробничої програми формалізуються в моделі наступними умовами:

1) Кількість виготовлених ПСПД має бути не менше планової кількості для кожної позиції номенклатурного плану:

$$p_n^{факт} \geq p_n^{план}, \tag{1}$$

де $p_n^{факт}$ – фактична кількість виготовлення ПСПД.

2) Задана кількість ПСПД має бути виготовлена протягом заданого терміну (за умови, що деякі позиції плану могли виготовлятися паралельно):

$$\sum_{n=1}^N t_n \leq T^{план}, \quad (2)$$

Для забезпечення умови мінімізації витрат ресурсів, що використовуються у ВП, вводяться локальні функції втрат, які мають такий вигляд:

$$\varphi_n^{(i)} = \varphi_n^{(i)}(\xi_1, \dots, \xi_m), \quad (3)$$

де i – відповідає заданому ресурсу, $\xi_1 = p_n^{неконд}$, $\xi_2 = q_n^{неконд}$, $\xi_3 = k_n^{ПСПД}$, ..., $\xi_m = h$ – параметри виробничого процесу, де $p_n^{неконд}$ – кількість некондиційних ПСПД, $q_n^{неконд}$ – кількість некондиційних форм, $k_n^{ПСПД}$ – коефіцієнт кондиційності ПСПД, h – клас суднобудівного бетону.

Умови мінімізації витрат ресурсів формалізуються у вигляді вимог до мінімізації локальних функцій втрат за рахунок вибору значень параметрів ВП. Були розроблені локальні функції втрат для виробничого процесу виготовлення ПСПД з урахуванням виділених типів ресурсів $\varphi_1, \dots, \varphi_{16}$.

Локальні функції втрат:

Критерій 1. План виробництва повинен бути виконаний

$$\varphi_1 = \sum_{n=1}^N P_n^{план} \cdot p_n^{план} - \sum_{n=1}^N P_n^{факт} \cdot p_n^{факт} \rightarrow \min, \quad (4)$$

де $P_n^{план}$ – нормативна вага однієї придатної ПСПД n -ої позиції плану у партії, $P_n^{факт}$ – фактична вага однієї придатної ПСПД n -ої позиції плану у партії.

Критерій 2. Бетон і арматурна сталь повинні бути якісними

$$\varphi_2 = B_j(z_j^{факт} \cdot l^v - z_j^{план}), \quad (5)$$

де B_j – об'єм завантаження j -го виду формувального обладнання, $z_j^{факт}$ – фактична кількість завантажень j -го виду обладнання в результаті яких була виготовлена придатна ПСПД, l^v – коефіцієнт усадження бетону при формуванні, v – клас бетону

$z_j^{план}$ – планова кількість завантажень j -го виду обладнання.

Критерій 3. Весь приготований бетон повинен бути залитий у форму-матрицю

$$\varphi_3 = B_j \cdot z_j^{факт} \cdot l^v - \left(\sum_{n=1}^N P_n^{факт} \cdot k_n^{СУБС} \cdot q_n^{конд} \right) \rightarrow \min, \quad (6)$$

де $k_n^{СУБС}$ – коефіцієнт системи укладання бетонної суміші, $q_n^{конд}$ – фактична кількість підготованих кондиційних форм.

Критерій 4. Система укладання бетонної суміші повинна бути спроектована раціонально

$$\varphi_4 = \left(\sum_{n=1}^N P_n^{факт} \cdot k_n^{фм} \cdot q_n^{конд} - \sum_{n=1}^N (P_n^{факт} \cdot p_n^{факт} + P_n^{неконд} \cdot p_n^{неконд}) \right) \rightarrow \min, \quad (7)$$

де $k_n^{фм}$ – коефіцієнт відношення фактичної маси ПСПД до нормативної, $P_n^{неконд}$ – фактична вага однієї некондиційної ПСПД n -ої позиції плану у партії.

Критерій 5. Якість вироблених ПСПД має бути високою

$$\varphi_5 = \sum_{n=1}^N P_n^{неконд} \cdot p_n^{неконд} \rightarrow \min. \quad (8)$$

Критерій 6. Фактична кількість виготовлених металевих форм-матриць має відповідати плановій

$$\varphi_6 = \sum_{n=1}^N (q_n^{конд} \cdot q_n^{неконд}) - \sum_{n=1}^N q_n^{план} \rightarrow \min. \quad (9)$$

Критерій 7. Підготовлені форми-матриці повинні бути високої якості

$$\varphi_7 = \sum_{n=1}^N q_n^{неконд} \rightarrow \min. \quad (10)$$

Критерій 8. Технологічні процеси підготовки бетонних сумішей повинні бути раціональними

$$\varphi_8 = \sum_{n=1}^N A_{nh}^{бс} \cdot q_n^{неконд} \rightarrow \min, \quad (11)$$

де $A_{nh}^{бс}$ – вага бетонної суміші для кожної позиції, h – клас суднобудівного бетону.

Критерій 9. Обладнання для виготовлення ПСПД має бути раціональним

$$\varphi_9 = \sum_{n=1}^N b_j \cdot e_j \cdot T_j^{\text{факт}} \cdot z_j^{\text{факт}} \rightarrow \min, \quad (12)$$

де b_j – кількість обладнання кожного типу, e_j – енергоємність кожного типу обладнання, $T_j^{\text{факт}}$ – фактичний час роботи обладнання.

Критерій 10. Докобудівне виробництво повинно бути економічним з точки зору витрат електроенергії

$$\varphi_{10} = \left(\sum_{j=1}^J b_j \cdot e_j \cdot T_j^{\text{факт}} - \sum_{j=1}^{J_1} b_j \cdot e_j \cdot T_j^{\text{факт}} \right) \rightarrow \min, \quad (13)$$

Критерій 11. Докобудівне виробництво повинно бути економічним з точки зору витрат води

$$\varphi_{11} = \sum_{j=1}^J z_j^{\text{факт}} \cdot V_j^{\text{факт}} + \sum_{n=1}^N q_n^{\text{конд}} \cdot V_n^{\text{факт}} \rightarrow \min, \quad (14)$$

де $V_j^{\text{факт}}$ – фактичний обсяг технічної води (насичений пар) спожитий виробництвом, $V_n^{\text{факт}}$ – фактичний обсяг питної води спожитий виробництвом.

Критерій 12. Кількість виробничого персоналу має бути раціональною для

$$\varphi_{12} = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R C_{rm} \text{ (kval)} \rightarrow \min, \quad (15)$$

де C_{rm} – кількість виробничого персоналу типу r в структурному підрозділі m .

Критерій 13. Кількість невиробничого персоналу повинна бути раціональною

$$\varphi_{13} = \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R S_{rm} \text{ (kval)} \rightarrow \min, \quad (16)$$

де S_{rm} – кількість невиробничого персоналу типу r в структурному підрозділі m , що мають тип кваліфікації $kval$.

Критерій 14. Час, витрачений на виготовлення форм-матриць, необхідно скорочувати

$$\varphi_{14} = \sum_{n=1}^N (t_n^{\text{конд}} \cdot q_n^{\text{конд}} + t_n^{\text{неконд}} \cdot q_n^{\text{неконд}}) \rightarrow \min, \quad (17)$$

де $t_n^{\text{конд}}$ – час витрачений на виготовлення кондиційних ПСПД, $t_n^{\text{неконд}}$ – час витрачений на виготовлення некондиційних ПСПД.

Критерій 15. Час, витрачений на виготовлення ПСПД, необхідно скорочувати

$$\varphi_{15} = \sum_{n=1}^N (t_n^{\text{конд}} \cdot p_n^{\text{конд}} + t_n^{\text{неконд}} \cdot p_n^{\text{неконд}}) \rightarrow \min. \quad (18)$$

Критерій 16. Трудомісткість ВП повинна бути раціональною

$$\varphi_{16} = \left(\sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R C_{rm} \cdot h_m \cdot d_m \cdot w_m - \sum_{m=1}^M C_{rm} \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K t_{kn}^{\text{факт}} \cdot p_n^{\text{факт}} \right) \rightarrow \min, \quad (19)$$

де h_m – кількість робочих годин у зміну, d_m – кількість робочих днів в місяць, w_m – кількість робочих змін в день, $t_{kn}^{\text{факт}}$ – час витрачений на виконання операції виробничого процесу, k – вид операції виробничого процесу.

Таким чином, завдання зниження фондоконцентрації ВП виготовлення ПСПД зводиться до визначення набору значень параметрів ξ_j . Мінімізація кожної з побудованих локальних функцій окремо не забезпечить необхідний результат. Наприклад, скорочення витрат електроенергії можна досягти за рахунок скорочення кількості робочого обладнання, однак це призведе до збільшення термінів виготовлення плоских секцій понтона доку, що неприпустимо. Для комплексної оцінки фондоконцентрації виробничого процесу будеється сукупний функціонал втрат таким чином, щоб його мінімальне значення відповідало мінімальній фондоконцентрації ВП. Структура запропонованої моделі розроблена з використанням методології IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling), що базується на технології структурного аналізу і проектування, – вона наведена на рис. 2.

У лінійному наближенні сукупний функціонал втрат має вигляд:

$$\Phi = \sum_{k=1}^K a_k \cdot \varphi_k \rightarrow \min, \quad (20)$$

де K – число локальних функцій втрат в розрахунках становить 16; a_k – їх відносні ваги з розмірністю $\frac{\text{грн}}{\text{розмірність } \varphi_k}$ і значеннями, які визначаються експертно.

Співвідношення (ваги) сформульованих критеріїв (у даному випадку їхню роль відіграють локальні функції витрат) визначаються методом експертних оцінок.

Завдання, яке розглядається, виявляється не тільки багатопараметричним, але й багатокритеріальним, і вирішується методом лінійного згортання критеріїв. В якості критеріїв розглядаються такі: скорочення витрат металу, скорочення витрат суднобудівного бетону,

скорочення витрат електроенергії, скорочення витрат води, скорочення тривалості виробничого процесу і скорочення кількості персоналу. Співвідношення критеріїв було визначено методом експертних оцінок ($\omega_1^{norm} = \omega_2^{norm} = 0,34$, $\omega_3^{norm} = \omega_4^{norm} = \omega_5^{norm} = 0,03$, $\omega_6^{norm} = 0,00058$).

В рамках кожної групи функцій витрат ресурсів відносна вага розподіляється рівномірно. Таким чином, отримуємо модель ВП виготовлення ПСПД для оцінки впливу організації виробництва:

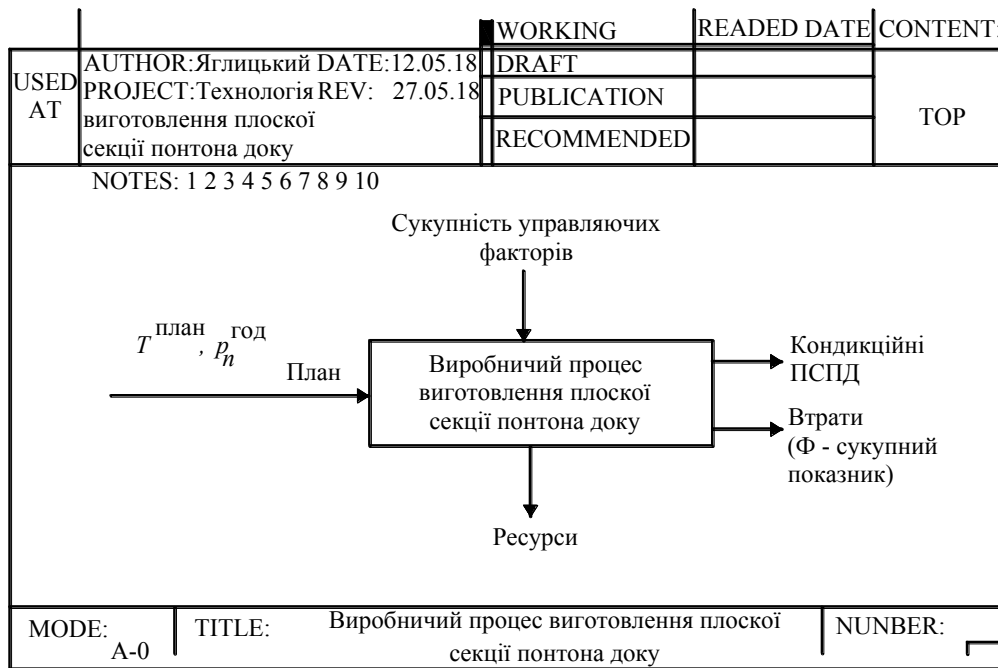


Рис. 2 – Загальна структура моделі виробничого процесу виготовлення ПСПД

$$\left. \begin{cases} \Phi = \sum_{k=1}^{16} a_k \cdot \varphi_k \rightarrow \min \\ P_n^{год} \geq P_n^{план} \\ \sum_{n=1}^N t_n \leq T^{план} \end{cases} \right\} \quad (21)$$

Рішенням системи (21) є набори параметрів $(\xi_1^0, \dots, \xi_m^0)$, при яких сукупний функціонал витрат Φ досягає мінімального значення Φ^0 :

$$\Phi^0 = \Phi(\xi_1^0, \dots, \xi_m^0) \quad (22)$$

Цей набір параметрів формується під впливом організації виробництва. Оскільки набору ξ_i однозначно відповідають вимірювані величини, то можна стверджувати, що при значеннях параметрів

$(\xi_1^0, \dots, \xi_m^0)$ буде забезпечена мінімальна фондоконцентрація ВП виготовлення ПСПД.

Моніторинг ідентичності математичної моделі ВП, узагальнення та інтерпретація отриманих даних

У ході моделювання визначаються основні характеристики ВП: необхідна кількість металу P^m , суднобудівного бетону $P^{сб}$, електроенергії P^e , води P^w , персоналу P^n , часу $P^{рп}$ для виробництва фактичної кількості плоских секцій, яка дорівнює плановій з урахуванням витрат.

Перевірка моделі на ідентичність проводилася шляхом зіставлення результатів моделювання при значенні результуючих параметрів, що відповідають реальним значенням чинного докوبудівного виробництва. Період дослідження становив 1 рік. Використовуючи метод спостереження (цілеспрямованої фіксації в спеціально розробленому протоколі з подальшим аналізом) були отримані фактичні дані по витратах розглянутих типів ресурсів: металу, суднобудівного бетону, води, електроенергії, персоналу і часу.

Відомі організаційні й технічні умови визначають значення параметрів ВП. В результаті моделювання з відомими значеннями параметрів ВП за досліджуваній період $(\xi_1^*, \dots, \xi_m^*)$, при яких сукупний функціонал витрат Φ досягає свого поточного (дійсного) значення Φ^* визначаються «модельні» значення витрат ресурсів. Модельний експеримент проводився 12 разів, що відповідає виробничим даним за кожен місяць.

Результати порівняння фактичних даних з модельним значенням витрат ресурсів свідчать про те, що розроблена модель ідентична реальному ВП, що дозволяє проводити на ній експерименти щодо зниження фондоконцентрації ВП за рахунок керуючих впливів.

Обговорення результатів

З використанням представленої моделі проведено дослідження впливу різних організаційно-технічних заходів на фондоконцентрацію ВП, причому одне і теж саме необхідне значення фондоконцентрації може бути забезпечено реалізацією різних заходів. На основі моделювання була проведена оцінка різних управляючих впливів на витрати ресурсів у ВП.

Наприклад, застосування систем моделювання і аналізу процесу формування дозволяє скоротити фондоконцентрацію ВП наступним чином. Витрати бетону через ризик виробництва некондиційних ПСПД шляхом раціоналізації системи укладання бетонної суміші і попереднього відпрацювання ВП на моделі скорочуються на 8 %. Крім того, скорочуються витрати інших видів ресурсів, які були

пов'язані з доведенням до кондиції ПСПД: суднобудівного бетону на 6 %, електроенергії на 4 %, води на 4 % і персоналу на 6 %. Тривалість ВП скорочується на 12,3 години за рахунок скорочення тривалості етапу конструкторсько-технологічної підготовки виробництва, скорочення часу на доробку некондиційних заготовок ПСПД – на 23 %. Крім того, будь-який захід, в результаті якого відбувається зниження ризику виробництва некондиційних заготовок ПСПД має аналогічний ефект.

Була проведена апробація розробленої моделі на основі оцінки двох *експрес-прогнозів* (рис. 3) зниження фондоконцентрації для корпусного цеху докобудівного підприємства.

Експрес-прогноз № 1 передбачає:

- 1) Підвищення кваліфікації персоналу (навчання для роботи з системами моделювання та аналізу процесу формування залізобетонних плит).
- 2) Застосування систем моделювання і аналізу процесу формування залізобетонних плит.
- 3) Контроль якості бетонної суміші.
- 4) Посилення контролю керівництва на етапі формування.

Експрес-прогноз № 2 передбачає:

- 1) Підвищення кваліфікації персоналу (тих, хто готує бетонну суміш і здійснює заливку форм).
- 2) Контроль дотримання температурних режимів.
- 3) Застосування САД-систем.
- 4) Застосування систем автоматизованого проектування технологічних процесів.
- 5) Контроль планування завантаження устаткування для формування залізобетонних плит.

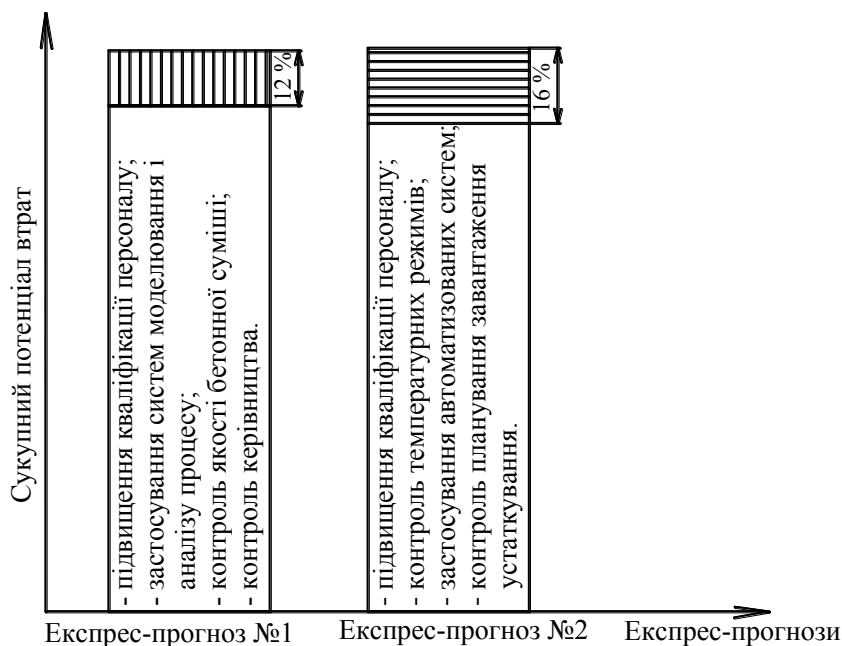


Рис. 3 – Результати проведення експрес-прогнозів

Якщо провести серію експрес-прогнозів, то можна встановити динаміку змін сукупного потенціалу втрат в залежності від управляючих впливів на основні характеристики ВП. Це дає змогу для подальших досліджень в області питань оптимізації фондоконцентрації ВП побудови композитних доків.

Висновки

Розроблено перелік параметрів і локальних функцій втрат для ВП з урахуванням виділених типів ресурсів, який у подальшому дає змогу забезпечення умов мінімізації витрат ресурсів.

Створена загальна структура моделі виробничого процесу виготовлення ПСПД, яка дає змогу комплексно оцінювати витрати основних ресурсів виробничого процесу та регулювати значення параметрів.

Виконано перевірку моделі на ідентичність шляхом зіставленням результатів моделювання при значенні результуючих параметрів, що відповідають реальним значенням чинного докобудівного виробництва. В результаті моделювання були отримані значення показників витрат ресурсів: кількість металу P^m з ймовірністю 93 % відповідає реальному споживанню металу в ВП; кількість суднобудівного бетону P^{cb} з ймовірністю 95 % відповідає реальному споживанню суднобудівного бетону в ВП; споживання електроенергії P^e з ймовірністю 94 % відповідає реальному споживанню електроенергії в ВП; кількість води P^w з ймовірністю 9 % відповідає реальному споживанню води у ВП; кількість персоналу P^n з ймовірністю 97 % відповідає реальній кількості персоналу у ВП; кількість часу P^{cp} з ймовірністю 95 % відповідає реальним витратам часу в ВП.

Проведена апробація розробленої моделі на основі оцінки двох експрес-прогнозів зниження фондоконцентрації для корпусного цеху докобудівного підприємства. Було встановлено, що перший сценарій забезпечує зниження сукупного функціоналу втрат на 12 %, а другий на 16 %.

Список літератури

1. Рашковський О. С. *Проектування, технологія і організація побудови композитних плавучих доків: навч. посіб.* Миколаїв, 2015. 254 с.
2. Мишутин Н. В., Мишутин А. В. Железобетонные плавучие сооружения и перспективы их использования. *Вісник ОДАБА*. 2002. № 6. С. 181–186.
3. Щедролов А. В., Кириченко К. В. Анализ состояния строительства плавучих доков. *Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi Əsərləri*. 2018. № 1. С. 48–58.
4. Чернецка Ю. А. Методи багатокритеріальної оптимізації структури капіталу підприємства. *Науковий вісник Одеський національний економічний університет*. 2012. № 10 (162). С. 100–110.
5. Rashkovskiy A., Ermakov D., Dong Z. Innovative technologies in composite floating docks construction.

6. Wang C.M., Utsunomiya T. Pontoon-type very large floating structures. *Structural Engineer*. 2007. № 85 (16). P. 15–17.
7. Kyrychenko K., Yahlytskyi Yu., Schedrolov O. Methods of improvement of the design and construction technology of composite docks. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*. 2019. №2 (10). P. 36–47.
8. Schedrolov O., Korostylov L., Klymenkov S., Uzlov O., Kyrychenko K. Improvement of the structure of floating docks based on the study into the stressed-deformed state of pontoon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6. No. 7 (96). P. 26–31. doi.10.15587/1729-4061.2018.150346.
9. Zheng P., Pei Z., Liu W., Zhao Q. Research on Structural Strength Direct Calculation of Pontoon Bridge Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Jiaotong Kexue Yu Gongcheng Ban. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*. 2017. № 41 (3). P. 517–522. doi.10.3963/j.issn.2095-3844.2017.03.032.
10. Firat Y., Easley R., Zinserling M. Design and Construction of Two Concrete Pontoons to Serve as Berths at the Port of Juneau Cruise Ship Terminal Ports 2016: Port Planning and Development. *Papers from Sessions of the 14th Triennial International Conference*. 2016. P. 193–203. doi.10.1061/9780784479919.020.
11. Zhang X. X., Du B. S., Wu Z. L. Safety protective effect of a novel FRP floating pontoon for piers against ship-collision. *Bridge Maintenance, Safety, Management and Life Extension – Proceedings of the 7th International Conference of Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS*. 2014. P. 2070–2078. doi.10.1201/b17063-319.
12. Xujun Chen, Yuji Miao, Xuefeng Tang and Junyi Liu. Numerical and experimental analysis of a moored pontoon under regular wave in water of finite depth. *Ships and Offshore Structures*. 2016. Vol.12. Iss. 3. P. 412–423. doi.10.1080/17445302.2016.1172831.
13. Iwańkiewicz R. Object-matrix model of complex manufacturing technology. *Industrial Management and Data Systems*. 2008. № 108 (8). P. 1131–1148. doi.10.1108/02635570810904659.
14. Rose C., Coenen J., Hopman H. Definition of ship outfitting scheduling as a resource availability cost problem and development of a heuristic solution technique. *Journal of Ship Production and Design*. 2016. № 32 (3). P. 139–153. doi.10.5957/JSPD.32.3.150003.
15. Рашковский А. С., Нейман В. М. Совершенствование подготовки производства для строительства композитных плавучих сооружений. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2017. № 1 (16). С. 192–201.

References (transliterated)

1. Rashkovskiy O. S. *Proektuvannya, tekhnolohiya i orhanizatsiya pobudovy kompozynykh plavuchykh dokiv. Mykolaiv* [Design, technology and organization of construction of composite floating docks], 2015, 254 p.
2. Mishutin, N. V., Mishutin, A. V. Zhelezobetonnye plavuchie sooruzheniya i perspektivy ih ispol'zovaniya [Reinforced concrete floating structures and prospects for their use]. *Visnyk ODABA*, 2002, no. 6, pp. 181–186.
3. Shchedrolov, A. V., Kyrychenko, K. V. Analiz sostoyaniya stroitel'stva plavuchih dokov [Analysis of the state of construction of floating docks]. *Azərbaycan Dövlət*

- Dəniz Akademiyasının Elmi Əsərləri*, 2018, no. 1, pp. 48-58.
- Chernetskaya Yu. A. Metody bahatokriterialnoi optimizatsii struktury kapitalu pidpriemstva [Methods of multi-criteria optimization of enterprise capital structure]. *Naukovyi visnyk. Odeskyi natsionalnyi ekonomichnyi universytet*. [Scientific Bulletin. Odessa National University of Economics]. 2012, iss.10 (162), pp. 100-110.
 - Rashkovskiy A., Ermakov D., Dong Z. Innovative technologies in composite floating docks construction. *Shipbuilding and marine infrastructure*. 2014, no. 2, pp. 93-102.
 - Wang, C. M., Utsunomiya, T. Pontoon-type very large floating structures. *Structural Engineer*. 2007, no. 85 (16), pp. 15-17.
 - Kyrychenko K., Yahlytskyi Yu., Schedrolosiev O. Methods of improvement of the design and construction technology of composite docks. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*. 2019, no. 2 (10), pp. 36-47.
 - Schedrolosiev O., Korostylov L., Klymenkov S., Uzlov O., Kyrychenko K. Improvement of the structure of floating docks based on the study into the stressed-deformed state of pontoon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, no. 6, 7 (96). pp. 26-31, doi.10.15587/1729-4061.2018.150346.
 - Zheng P., Pei Z., Liu W., Zhao Q. Research on Structural Strength Direct Calculation of Pontoon Bridge Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Jiaotong Kexue Yu Gongcheng Ban). *Journal of Wuhan University of Technology* (Transportation Science and Engineering). 2017, no. 41 (3), pp. 517-522, doi.10.3963/j.issn.2095-3844.2017.03.032.
 - Firat Y., Easley R., Zinserling M. Design and Construction of Two Concrete pontoons to serve as Berths at the Port of Juneau Cruise Ship Terminal Ports 2016: Port Planning and Development. *Papers from Sessions of the 14th Triennial International Conference*, 2016, pp. 193-203, doi.10.1061/9780784479919.020.
 - Zhang X. X., Du B. S., Wu Z. L. Safety protective effect of a novel FRP floating pontoon for piers against ship-collision. *Bridge Maintenance, Safety, Management and Life Extension – Proceedings of the 7th International Conference of Bridge Maintenance, Safety and Management*, IABMAS, 2014, pp. 2070-2078, doi.10.1201/b17063-319.
 - Xujun Chen, Yuji Miao, Xuefeng Tang and Junyi Liu. Numerical and experimental analysis of a moored pontoon under regular wave in water of finite depth. *Ships and Offshore Structures*. 2016, vol. 12, is. 3, pp. 412-423, doi.10.1080/17445302.2016.1172831.
 - Iwańkiewicz R. Object-matrix model of complex manufacturing technology. *Industrial Management and Data Systems*. 2008, no. 108 (8), pp. 1131-1148, doi.10.1108/02635570810904659.
 - Rose C., Coenen J., Hopman H. Definition of ship outfitting scheduling as a resource availability cost problem and development of a heuristic solution technique. *Journal of Ship Production and Design*. 2016, no. 32 (3), pp. 139-153, doi.10.5957/JSPD.32.3.150003.
 - Rashkovskiy, A. S., Nejman, V. M. Sovershenstvovanie podgotovki proizvodstva dlya stroitelstva kompozitnykh plavuchih sooruzhenij [Improving production preparation for the construction of composite floating structures]. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*. 2017, no. 1 (16), pp. 192-201.

Відомості про авторів (About authors)

Яглицький Юрій Костянтинович – кандидат технічних наук, доцент, Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, доцент кафедри Суднобудування та ремонту суден, м. Херсон, Україна; ORCID: 0000-0002-4865-0411; e-mail: yahlytskyiyurii@gmail.com.

Yurii Yahlytskyi – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Shipbuilding and Ship Repair, Kherson branch of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4865-0411; e-mail: yahlytskyiyurii@gmail.com.

Кириченко Костянтин Володимирович – Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, викладач кафедри Суднобудування та ремонту суден, м. Херсон, Україна; ORCID: 0000-0002-0974-6904; e-mail: kostiantynkyrychenko@nuos.edu.ua.

Kostiantyn Kyrychenko – lecturer, Department of Shipbuilding and Ship Repair, Kherson branch of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine; ORCID: 0000-0002-0974-6904; e-mail: kostiantynkyrychenko@nuos.edu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Яглицький Ю. К., Кириченко К. В. Розробка математичної моделі виробничого процесу виготовлення плоскої секції понтона композитного доку. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 1 (3). С. 43-53. doi:10.20998/2413-4295.2020.03.06.

Please cite this article as:

Yahlytskyi Y., Kyrychenko K. Development of a mathematical model for the workflow of manufacturing of a flat section of a composite dock pontoon. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 1 (3), pp. 43-53, doi:10.20998/2413-4295.2020.03.06.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Яглицкий Ю. К., Кириченко К. В. Разработка математической модели производственного процесса изготовления плоской секции понтона композитного дока. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 1 (3). С. 43-53. doi:10.20998/2413-4295.2020.03.06.

АННОТАЦІЯ Проведено обзор известных технических решений в докостроении, направленных на обеспечение необходимых производственных параметров при изготовлении железобетонного понтона композитного дока, который показал, что в них не установлена связь с параметрами производственного процесса и отсутствует влияние изменений этих параметров на значение фондоконцентрации. Разработана модель производственного процесса изготовления плоской секции понтона дока, которая дает возможность на ней обрабатывать управляющие воздействия, снижающие вероятность появления рисков при изготовлении корпуса дока. С помощью представленной модели можно будет оценивать снижение как неэффективных затрат ресурсов за счет управления рисками производственного процесса, так и сокращения нормативных затрат ресурсов вследствие реализации мер по усовершенствованию организации производства. Для разработки математической модели производственного процесса изготовления плоской секции понтона дока формализованы требования, обуславливающие выполнение производственной программы предприятия при обеспечении условия минимизации затрат ресурсов в виде системы уравнений. В результате проведенного исследования докостроительного производства были выделены шесть основных типов ресурсов, затраты которых влияют на формирование фондоконцентрации изготовленных плоских секций понтона дока – металл, бетон, вода, электроэнергия, персонал и время. Проведено комплексную оценку фондоконцентрации производственного процесса за счет совокупного функционала затрат при условии, что его минимальное значение отвечает минимальной фондоконцентрации производственного процесса. Разработана структура предложенной модели с использованием методологии *Integration Definition for Function Modeling*. Проверка модели на идентичность проводилась путем сопоставления результатов моделирования при значении результирующих параметров, отвечающих реальным значениям действующего докостроительного производства. С использованием разработанной модели проведено исследование влияния различных организационно-технических мероприятий на фондоконцентрацию производственного процесса и сделана оценка управляющих влияний на затраты ресурсов в производственном процессе.

Ключевые слова: понтон; композитный плавучий док; железобетонная плита; плоская секция понтона дока; фондоконцентрация; математическая модель производственного процесса

Надійшла (received) 10.02.2020