

УДК 69.002.5:621.879

## Организационно-технологическая надежность эксплуатации башенных кранов

В.Н. Анферов<sup>1, a</sup>, С.М. Кузнецов<sup>1, b</sup>, С.И. Васильев<sup>2, c</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Д. Ковальчук 191, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, пр. Свободный 82, Красноярск, Россия

<sup>a</sup>avn43@mail.ru, <sup>b</sup>ksm56@yandex.ru, <sup>c</sup>S-vasilev1@yandex.ru

Статья поступила 15.12.2012, принята 15.04.2013

*Предложен метод оценки организационно-технологической надежности работы башенных кранов на конкретных строительных объектах с помощью имитационных моделей, который позволяет прогнозировать основные показатели работы кранов, такие как продолжительность и стоимость производства работ. Этот метод является универсальным, и его можно использовать для оценки организационно-технологической надежности работы любых парков, комплексов, комплектов и отдельных строительных машин. Для оценки организационно-технологической надежности кранов башенного типа авторами предложена имитационная модель и введено понятие рассматриваемой надежности как вероятности достижения комплекса крановой техники конечной цели при выполнении проекта строительных работ. При этом процесс выполнения строительного-монтажных работ как в сфере гражданского строительства, так и в промышленном строительстве, принимается как стохастическая система с множеством соподчиненных прямых и обратных связей. Классическая модель не рассматривается, так как существенным образом не соответствует реальным условиям строительства зданий и сооружений. Отличительной особенностью предлагаемого метода оценки организационно-технологической надежности кранов башенного типа является возможность учета не только конструктивных параметров крана (масса крюковой обоймы, скорость выполнения рабочих операций), но и тех параметров, которые регламентированы требованиями Ростехнадзора. Использование излагаемого подхода к оценке организационно-технологической надежности башенного крана, при небольших доработках, может быть распространено на любой тип крановой техники и позволяет получить численные значения оценки надежности, что весьма актуально при выборе не только типа крановой техники, но и скоростных и грузových характеристик.*

**Ключевые слова:** организационно-технологическая надежность, стреловые краны, имитационное моделирование.

## Organizational and technological reliability of tower cranes operation

V.N. Anferov<sup>1, a</sup>, S.M. Kuznetsov<sup>1, b</sup>, S.I. Vasil'yev<sup>2, c</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Transport University, Novosibirsk, 191 D. Koval'chuk st., Russia

<sup>2</sup>Siberian Federal University, 82 Svobodny av., Krasnoyarsk, Russia

<sup>a</sup>avn43@mail.ru, <sup>b</sup>ksm56@yandex.ru, <sup>c</sup>S-vasilev1@yandex.ru

Received 15.12.2012, accepted 15.04.2013

*The technique to assess the organizational and technological performance reliability of tower cranes on the specific construction projects using simulation models has been proposed. This technique allows forecasting the cranes performance main indicators such as duration and cost of work. It is universal and can be used to assess the organizational and technological reliability of work of any stocks, complexes, sets and separate construction machinery. To assess the organizational and technological reliability of tower cranes, the authors propose a simulation model and introduce the concept of the considered reliability as the probability of achieving the ultimate goal while executing the construction works project. Meanwhile, the process of executing construction and installation activities in the field of civil engineering and industrial construction is considered as a stochastic system with a set of coordinated direct communication and feedback. Classical model is not considered as it doesn't essentially correspond to the real building and construction conditions. A distinctive feature of the proposed technique to assess the organizational and technical reliability of tower cranes is the ability to take into account not only the crane design parameters (hook block weight, speed of work operations performing) but the parameters that are regulated by the Rostekhnadzor requirements. The use of the stated approach to assess the organizational and technical reliability of a tower crane can be applied to any type of crane equipment and allows obtaining the numerical values of the reliability assessment that is very urgent when choosing not only the type of equipment, but also its speed performance and cargo characteristics.*

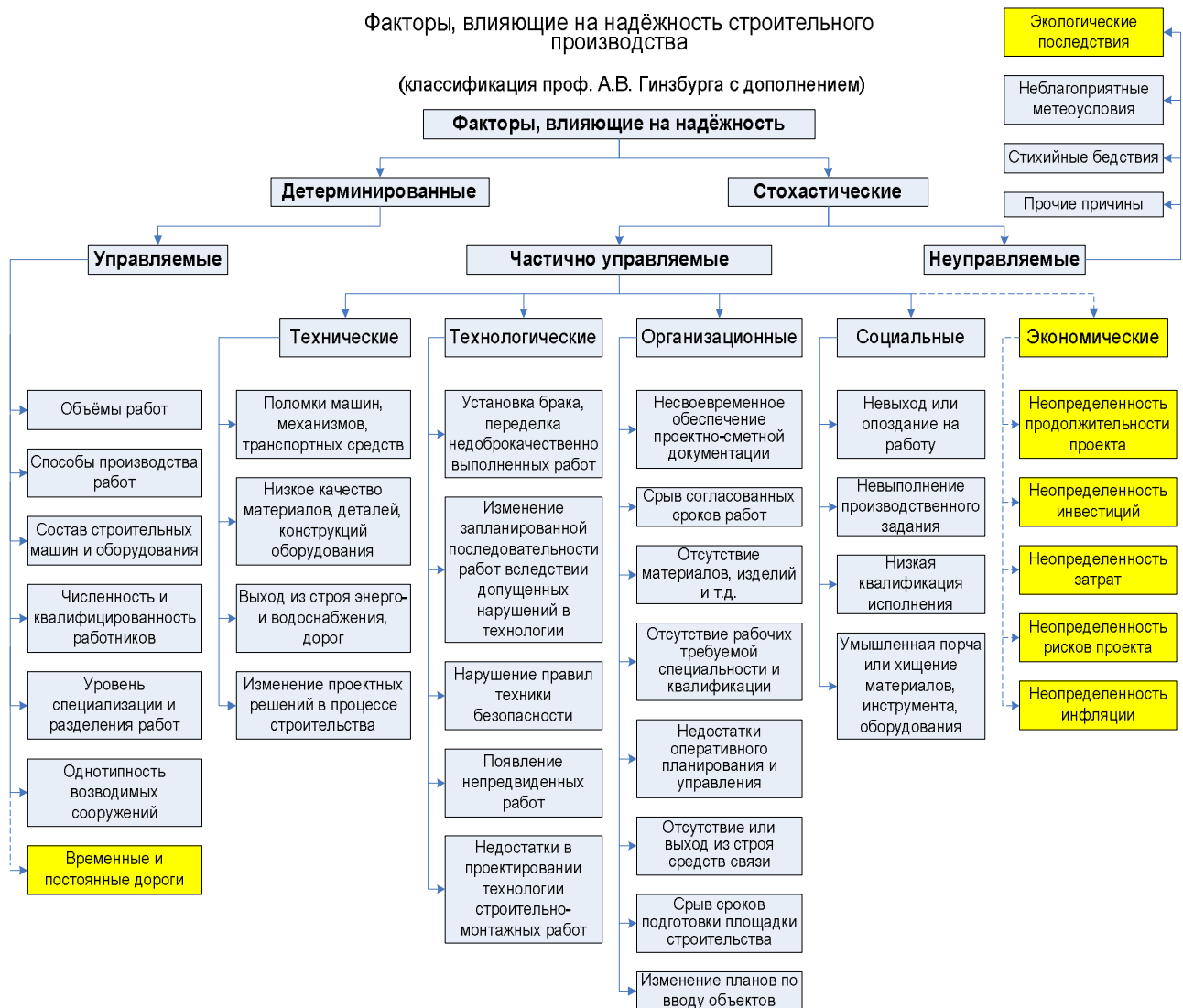
**Keywords:** organizational-technological reliability, jib cranes, simulation modeling.

**Введение.** Для оценки организационно-технологической надежности (ОТН) работы стреловых кранов разработаны соответствующие имитационные модели [1]. Под организационно-технологической надежностью понимается вероятность достижения рассматриваемой системой заданного результата строительного

производства. Процесс строительства зданий и сооружений рассматривается нами, как сложная стохастическая система. Классические методы математической теории надежности не учитывают реальную ситуацию, и их применение в чистом виде не является приемлемым. Выход из данной ситуации возможен

лишь при детальном изучении специфики строительного производства, а именно многообразных, многочисленных организационно-технологических сбоев, дестабилизирующих производство факторов, а также прин-

ципов взаимодействия этих факторов с имеющимися сбойми [2]. Факторы, влияющие на организационно-технологическую надежность строительного производства, приведены на рис. 1.



**Рис 1.** Дестабилизирующие факторы строительного производства

**Постановка задачи.** Экспертный анализ показателя ОТН календарного плана строительства показывает, что наиболее рациональными значениями для ОТН являются значения в диапазоне от 0,5 до 0,7 [2]. Превышение этих значений, приближение ОТН к единице свидетельствует о так называемой избыточной надежности и перерасходе вкладываемых в обеспечение надежности строительства ресурсов. Оценка ОТН дает возможность оценивать сформированные календарные планы строительства объектов не только с точки зрения качества организационно-технологических характеристик, но и с точки зрения надежности их достижения.

**Методика исследования.** В настоящее время существует пять способов оценки организационно-технологической надежности работы строительных машин с использованием:

– статистических моделей [3];

– вероятностных экономико-математических моделей [4];

– имитационных моделей [5];

– аналитический;

– с помощью метода экспертных оценок.

**Решение задачи.** В данной статье использована приведенная ниже имитационная модель работы стреловых кранов, применяемых при строительстве зданий и сооружений [6]:

$$P_k = \frac{60 \cdot Q \cdot T_c \cdot K_b}{T_{ц}}, \quad (1)$$

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n (1,1 \cdot P_{mi} + P_{ci}) \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n N_i}, \quad (2)$$

$$T_{ц} = T_{маш} + T_{руч}, \quad (3)$$

$$T_{маш} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{2 \cdot H_{ni}}{V_n} + \frac{2 \cdot \alpha_i}{360 \cdot \omega} + \frac{S_{ti}}{V_t} \right) \cdot K_c + \frac{S_{di}}{V_d} \right] \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n N_i}, \quad (4)$$

$$T_{руч} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ручи} \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n N_i}, \quad (5)$$

$$H_{ni} = H_{oi} + H_3 + H_{эли} + H_{ci}, \quad (6)$$

$$T_c^h \leq T_c \leq T_c^k,$$

$$K_b^h \leq K_b \leq K_b^k,$$

$$H_{ni}^h \leq H_{ni} \leq H_{ni}^k,$$

$$V_n^h \leq V_n \leq V_n^k,$$

$$\alpha_i^h \leq \alpha_i \leq \alpha_i^k,$$

$$\omega^h \leq \omega \leq \omega^k,$$

$$S_{ti}^h \leq S_{ti} \leq S_{ti}^k,$$

$$V_t^h \leq V_t \leq V_t^k,$$

$$S_{di}^h \leq S_{di} \leq S_{di}^k,$$

$$V_d^h \leq V_d \leq V_d^k,$$

$$H_{oi}^h \leq H_{oi} \leq H_{oi}^k,$$

где  $n$  – количество проектировок;  $Q$  – средняя масса элементов, монтируемых краном;  $T_{ц}$  – средняя продолжительность рабочего цикла (складывающаяся из времени, затрачиваемого на строповку груза, перемещение груза к месту монтажа, удержание при временном закреплении, расстроповку и возвращение грузозахватного органа в исходное положение);  $T_{руч}$  – среднее время ручных операций (строповка элементов, установка, временное крепление, выверка и расстроповка);  $T_{маш}$  – среднее время машинных операций, включающее подъем крюка с грузом и опускание свободного крюка, поворот стрелы вокруг вертикальной оси при подаче элемента от площадки складирования к месту его установки, передвижку крана вдоль фронта работ;  $P_{mi}$  – масса  $i$ -го элемента, поднимаемого краном;  $P_{ci}$  – масса строповочных устройств и монтажной оснастки для  $i$ -го элемента;  $H_3$  – запас хода по нормам Ростехнадзора между опорой и элементом при его перемещении к месту установки;  $H_{эли}$  – высота монтируемого  $i$ -го элемента;  $H_{ci}$  – монтажная высота строповочных приспособлений для монтажа  $i$ -го элемента;  $N_i$  – количество  $i$ -х элементов;

*равномерно распределенные случайные величины:*

$T_c$  – продолжительность смены;  $K_b$  – коэффициент использования крана по времени;  $H_{ni}$  – средняя высота

подъема и опускания крюка крана при монтаже  $i$ -го элемента, принимается ориентировочно по монтажно-му разрезу;  $V_n$  – средняя скорость перемещения крюковой подвески по вертикали;  $\alpha_i$  – средний угол поворота крана при монтаже  $i$ -го элемента;  $\omega$  – скорость вращения крана (число оборотов стрелы);  $S_{ti}$  – расстояние перемещения элемента по горизонтали за счет перемещения грузовой каретки башенных кранов с балочной стрелой при монтаже  $i$ -го элемента;  $V_t$  – скорость перемещения грузовой каретки;  $S_{di}$  – средняя длина продольной передвижки крана при монтаже  $i$ -го элемента;  $V_d$  – скорость перемещения крана;  $K_c$  – коэффициент совмещения операций;  $H_{oi}$  – средняя отметка, на которую устанавливают  $i$ -й элемент (от уровня стоянки крана до опоры);  $T_{ручи}$  – время ручных операций при монтаже  $i$ -го элемента;

*диапазоны изменения случайных величин:*

$T_c^h$  и  $T_c^k$  – минимальная и максимальная продолжительность смены;  $K_b^h$  и  $K_b^k$  – минимальный и максимальный коэффициент использования машины по времени;  $H_{ni}^h$  и  $H_{ni}^k$  – минимальная и максимальная высота подъема и опускания крюка крана при монтаже  $i$ -го элемента;  $V_n^h$  и  $V_n^k$  – минимальная и максимальная скорость перемещения крюка по вертикали;  $\omega^h$  и  $\omega^k$  – минимальная и максимальная скорость вращения крана;  $\alpha_i^h$  и  $\alpha_i^k$  – минимальный и максимальный угол поворота крана при монтаже  $i$ -го элемента;  $S_{ti}^h$  и  $S_{ti}^k$  – минимальное и максимальное расстояние перемещения элемента по горизонтали за счет перемещения грузовой каретки башенных кранов с решетчатой стрелой при монтаже  $i$ -го элемента;  $V_t^h$  и  $V_t^k$  – минимальная и максимальная скорость перемещения грузовой каретки;  $S_{di}^h$  и  $S_{di}^k$  – минимальная и максимальная длина продольной передвижки крана при монтаже  $i$ -го элемента;  $V_d^h$  и  $V_d^k$  – минимальная и максимальная скорость перемещения крана;  $K_c^h$  и  $K_c^k$  – минимальный и максимальный коэффициент совмещения операций;  $H_{oi}^h$  и  $H_{oi}^k$  – минимальная и максимальная средняя отметка, на которую устанавливают  $i$ -й элемент;  $T_{ручи}^h$  и  $T_{ручи}^k$  – минимальное и максимальное время ручных операций при монтаже  $i$ -го элемента.

Проведенные исследования с помощью приведенной выше имитационной модели позволили выявить факторы, влияющие на ОТН работы монтажных кранов.

Для автоматизации расчета ОТН использования комплектов и отдельных строительных машин с помощью имитационных моделей в СГУПС разработано соответствующее программное обеспечение. Последнее позволяет для любой имитационной модели работы строительных машин методом Монте-Карло получить выборку заданного объема. После формирования выборки определяется ее принадлежность закону нормального распределения и строится кривая нормального распределения. Далее с заданным уровнем ОТН с помощью программы «Oth» определяются производительность, себестоимость и другие показатели работы строительных машин [7].

После формирования и проверки выборки в соответствии с ГОСТ 8.207-76 принадлежности закону нормального распределения и строилась кривая нормального распределения. Известно, что кривая нормального распределения выражается следующим уравнением

$$\rho_{\Pi_k} = \frac{1}{\sigma_k^{\Pi} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Pi_k - \bar{\Pi}_k)^2}{2\sigma_k^{\Pi 2}}}, \quad (7)$$

где  $\rho_{\Pi_k}$  – плотность распределения производительности крана;  $\Pi_k$  – значение производительности крана;  $\bar{\Pi}_k$  – средняя производительность крана;  $\sigma_k^{\Pi}$  – среднее квадратическое отклонение производительности крана;  $\pi$  – постоянное число;  $e$  – основание натурального логарифма.

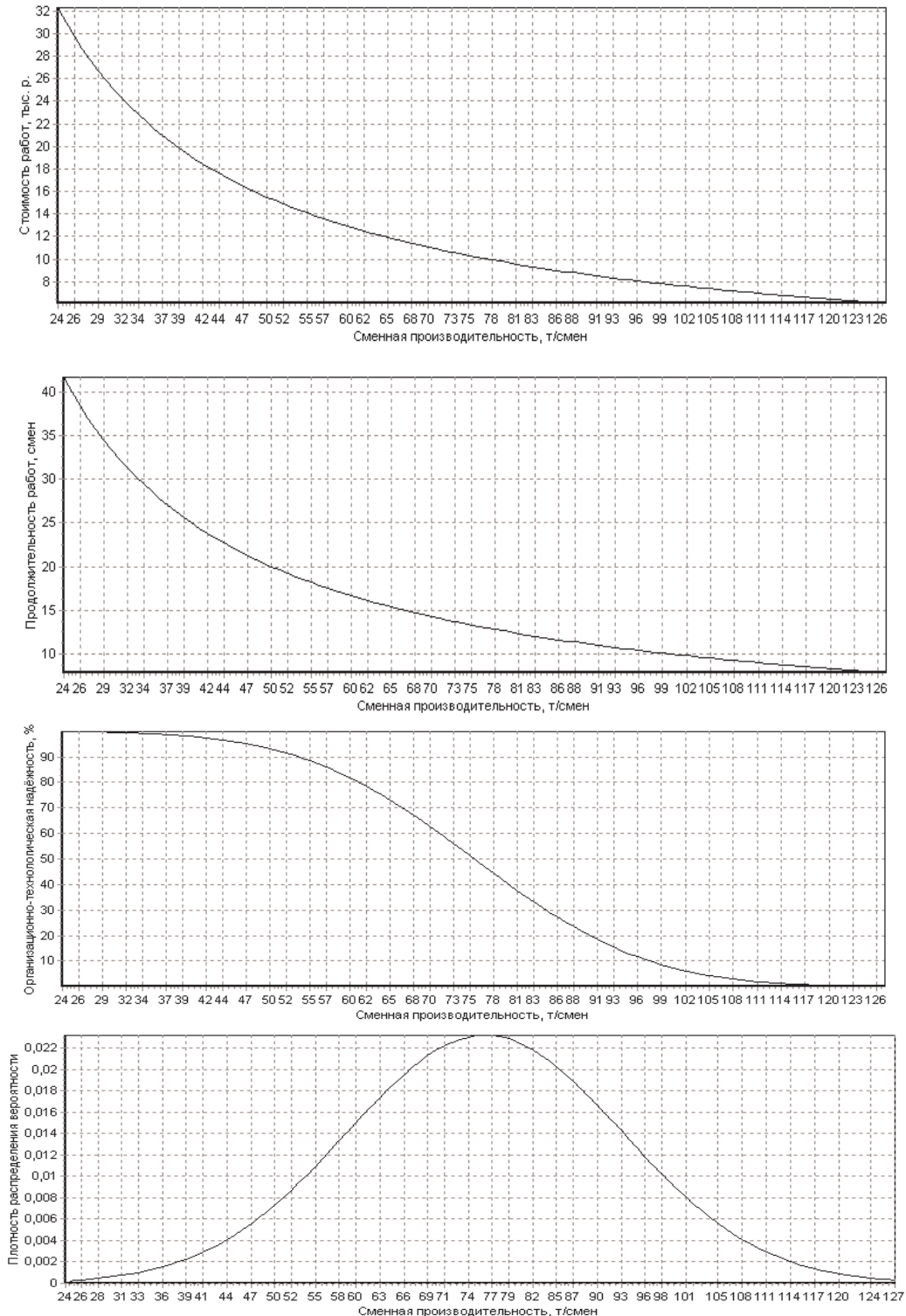


Рис. 2. Зависимости стоимости и продолжительности производства работ, ОТН и плотности распределения вероятности от сменной производительности гусеничного крана СКГ-25-36

Известно, что если площадь, ограниченную кривой нормального распределения, принять за 1 или 100 %, то можно, воспользовавшись формулой (7), рассчитать организационно-технологическую надежность (в процентах) достижения рассматриваемой системой производительности  $\pi_T$  по следующей формуле:

$$OTN = 100 - \frac{100}{\sigma_K^n \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{\pi_T} e^{-\frac{(\pi_K - \overline{\pi_K})^2}{2\sigma_K^{n2}}} d\pi_K. \quad (8)$$

Время работы крана определяется по формуле:

$$T_K = \frac{V}{\Pi_K}, \quad (9)$$

где  $V$  – объем работ.

Стоимость производства работ крана определяется по формуле:

$$C_K = C_{M-ч} \cdot T_K, \quad (10)$$

где  $C_{M-ч}$  – стоимость машино-часа работы крана.

На рис. 2 приведены результаты работы программы «Oth».

На практике для сокращения срока строительства сооружений используют несколько кранов (комплекс кранов). Для автоматизации формирования комплексов стреловых кранов с учетом ОТН надежности их работы можно воспользоваться программой «Komplex» [8]. На рис. 3 приведена схема формирования комплексов стреловых кранов с заданным уровнем ОТН их работы.

Исходными данными для этого программного обеспечения являются статистические показатели выборок по возможным сценариям использования комплектов и отдельных строительных кранов, полученные в результате работы программы «Oth». В таблице приведены технико-экономические показатели кранов, выбранных для строительства одноэтажного производственного здания. Показатели работы кранов были рассчитаны с помощью программы «Oth». Также приведен листинг работы программы «Komplex», исходными данными которой являлись показатели работы кранов, приведенные в таблице.

Таблица

Факторы, влияющие на ОТН работы стреловых кранов

Показатель	Обозначение
Продолжительность смены	$T_c$
Коэффициент использования по времени	$K_B$
Средняя высота подъема и опускания крюка крана при монтаже $i$ -го элемента, принимается ориентировочно по монтажному разрезу	$H_{\pi i}$
Средняя скорость перемещения крюка по вертикали	$V_{\pi}$
Средний угол поворота крана при монтаже $i$ -го элемента	$\alpha_i$
Скорость вращения крана (число оборотов стрелы)	$\omega$
Расстояние перемещения элемента по горизонтали за счет перемещения грузовой каретки башенных кранов при монтаже $i$ -го элемента	$S_{\pi i}$
Скорость перемещения грузовой каретки	$V_T$
Средняя длина продольной передвижки крана при монтаже $i$ -го элемента	$S_{д i}$
Скорость перемещения крана	$V_d$
Коэффициент совмещения операций	$K_c$
Средняя отметка, на которую устанавливают $i$ -й элемент (от уровня стоянки крана до опоры)	$H_{oi}$
Время ручных операций при монтаже $i$ -го элемента	$T_{руч i}$

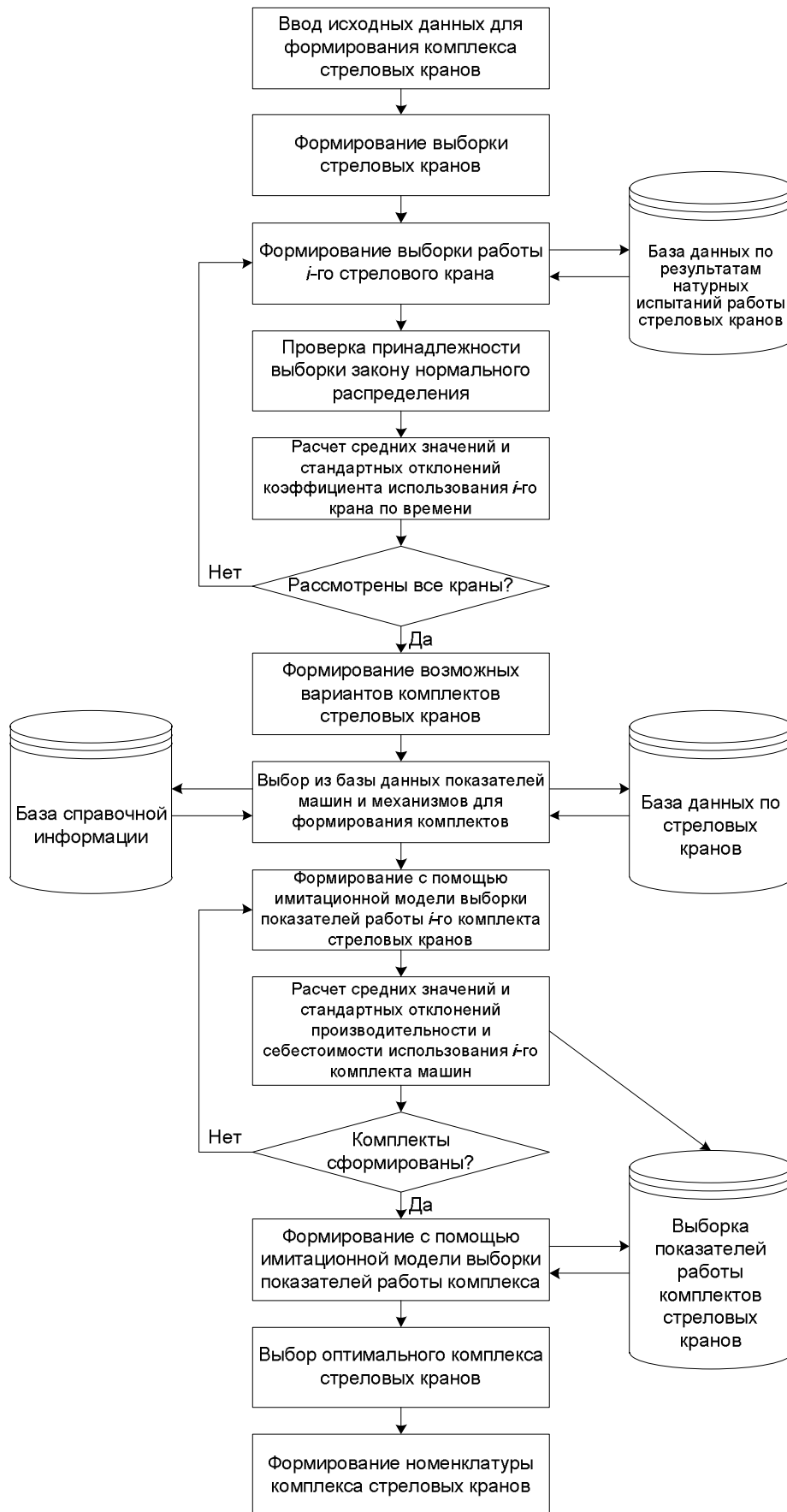


Рис. 3. Схема формирования комплекса стреловых кранов с заданной ОТН их работы

Следует отметить, что производительность комплекса кранов ( $P_K$ ) должна быть больше суммы требуемой производительности ( $P_T$ ) и риска комплекса кранов по производительности ( $r_K^H$ ) [8]:

$$P_K \geq P_T + r_K^H. \quad (11)$$

Риск комплекса кранов по производительности определяется по формуле:

$$r_K^H = \sqrt{V_K^H}, \quad (12)$$

где  $V_K^H$  – вариация отклонения от среднего значения производительности комплекса кранов.

Если условие (11) не выполняется, то требуемую производительность работы комплекса кранов определяем по формуле:

$$P_T^* = P_T + r_K^H. \quad (13)$$

В заключение формируем комплекс с заданной производительностью и рассчитываем для него основные технико-экономические показатели.

Разработанные в СГУПС имитационные модели оценки организационно-технологической надежности использования стреловых кранов позволяют по единой методике оценивать надежность их работы. Предложенный алгоритм формирования комплексов стреловых кранов с учетом их применения в реальных комплексах является универсальным. Он может быть использован для производства земляных работ, монтажа зданий и так далее. При этом можно оценить эффективность приобретения новых стреловых кранов с учетом уже имеющейся в парке номенклатуры кранов.

#### Вывод

Метод оценки организационно-технологической надежности работы стреловых кранов с помощью имитационных моделей позволяет прогнозировать основные показатели их работы. Этот метод является универсальным, и его можно использовать для оценки работы ОТН любых парков, комплексов, комплектов и отдельных строительных машин.

#### Литература

1. Кузнецов С.М., Серов М.Ю., Титов М.М. Имитационные модели для оценки организационно-технологической надежности при производстве бетонных работ // Механизация строительства. 2010. № 8. С. 27 – 30.
2. Системотехника строительства. Энциклопедический словарь / под ред. А.А. Гусакова. М.: Фонд «Новое тысячелетие», 1999. 432 с.
3. Лизунов Е.В., Седов В.А., С.М. Кузнецов С.М. Организационно-технологическая надёжность гидротранспортных систем // Строительные и дорожные машины. 2005. № 5. С. 19 – 21.
4. Кузнецов С.М., Лизунов Е.В., Щербаков А.В. Вероятностная модель работы многоступенчатых гидротранспортных систем // Изв. вузов. Строительство. 2006. № 9. С. 33 – 41.
5. Кузнецов С.М., Легостаева О.А. Организационно-технологическая надёжность экскаваторных комплектов // Там же. 2005. № 10. С. 62 – 69.
6. Кузнецов С.М., Легостаева О.А. Системотехника ресурсосберегающих технологических процессов строительства: моногр. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2004. 233 с.
7. Кузнецов С.М., Кузнецова К.С. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 9087 «ОТН работы строительных машин» от 26.09.2007 г.
8. Кузнецов С.М., Кузнецова К.С. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 6687 «Формирование парка строительных машин» от 14.08.2006 г.

#### References

1. Kuznetsov S.M., Serov M.Yu., Titov M.M. Simulation model to assess the organizational-technological reliability while performing concrete works // Mekhanizatsiya stroitel'stva. 2010. № 8. S. 27 – 30.
2. Building systems engineering. Thesaurus / Pod red. A.A. Gusakova. M: Fond «Nonoye tysyacheletie», 1999. 432 s.
3. Lizunov E.V., Serov M.Yu., Kuznetsov S.M. Organizational reliability of hydrotransport systems // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2005. № 5. S. 19 – 21.
4. Kuznetsov S.M., Lizunov E.V., Scherbakov A.V. Probabilistic model of multistage hydrotransport systems operation // Izv. vuzov. Stroitel'stvo. 2006. № 9.S. 33 – 41.
5. Kuznetsov S.M., Legostayeva O.A. Organizational reliability of excavator units // Izv. vuzov. Stroitel'stvo. 2005. № 10. S. 62 – 69.
6. Kuznetsov S.M., Legostayeva O.A. Systems engineering of resource-saving technological processes in construction: monogr. Novosibirsk: Izd-vo SGUPS, 2004. 233 s.
7. Kuznetsov S.M., Kuznetsova K.S. OTN of building machines operation: programma dlya EVM. Sv. GR № 9087. Zareg. 9.26. 2007.
8. Kuznetsov S.M., Kuznetsova K.S. Formation of building machines stock: programma dlya EVM. Sv. GR № 6687. Zareg. 8.14. 2006.