

УДК 625.1

## Влияние надежности строительных рабочих на производительность комплектов землеройно-транспортной техники

**Н. М. Панченко**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Панченко Н. М. Влияние надежности строительных рабочих на производительность комплектов землеройно-транспортной техники // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 197–205. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-197-205

### Аннотация

**Цель:** для получения качественной строительной продукции в установленные проектом сроки необходимо эффективное функционирование строительных процессов. Сроки строительства напрямую зависят от производительности техники, участвующей в процессе строительства. На производительность воздействует множество различных факторов. Часть из них регламентирована нормативной документацией, однако некоторые аспекты, такие как человеческий фактор (в частности, надежность строительных рабочих), остаются неучтенными. Целью представленного исследования является выявление закономерностей влияния этого показателя на эффективность работы строительных машин. **Методы:** использованы методы экономико-математического моделирования. Расчеты выполнены с применением формул теории надежности, теории вероятности и теории массового обслуживания. **Результаты:** определены производительности комплектов землеройно-транспортной техники и отдельных машин в комплектах с учетом надежности рабочих. По результатам расчетов построены графические зависимости производительности комплектов техники и отдельных машин в комплектах с учетом надежности рабочих для диапазона дальности возки грунта 0,5–2 км. Выявлено влияние надежности строительных рабочих на производительность строительной техники и его закономерности. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть полезны руководителям организаций в области транспортного строительства. Они помогут оценить возможности организации выполнять качественно и в установленные сроки заданные объемы работ с учетом такого важного фактора, как влияние надежности строительных рабочих на производительность техники.

**Ключевые слова:** надежность, отказ, восстановление, вероятность безотказной работы, производительность, строительный процесс, скрепер, бульдозер

Вопросы взаимодействия людей и техники в человеко-технических системах (ЧТС), надежности строительных процессов и их составляющих стали актуальными еще в начальный период развития комплексной механизации, автоматизации, точности в строительстве и до настоящего времени не теряют своей актуальности.

Исследованиям надежности производственных процессов посвящен ряд трудов отечественных и зарубежных ученых. Например, А. Б. Крейман указывает на связь эффективности строительных потоков с их надежностью и предлагает включить в ПОС и ППР показатели надежности. О. Б. Белецкий предлагает алгоритмы решения задач проектирования строительных потоков с заданной надежностью и сроком строительства на основе методов статистического моделирования.

В работах А. А. Гусакова обоснована необходимость исследования надежности на всех стадиях строительства и использования для этого теории надежности в качестве математического аппарата. Труды Э. С. Спиридонова по организационно-технологической надежности определяют способность строительных систем выполнять заданные функции в установленные сроки с надлежащим качеством.

Теме организационно-технологической надежности посвящены труды литовского ученого Э. К. Завадскаса. Иранский ученый А. Хаджсаид известен своими разработками в области гибридного моделирования, совмещающего дискретно-событийные модели строительных площадок с агентным моделированием поведения рабочих и техники. Ведущий канадский исследователь С. Лухунаге создал передовые программные комплексы для компьютерного моделирования строительных операций, которые позволяют прогнозировать риски, сроки и затраты крупных инфраструктурных проектов.

Однако в перечисленных выше исследованиях учет роли человека производится в основном на уровне определения трудозатрат, а влияние рабочих на изменение производительности строительных процессов, динамика воздействия обратных связей в ЧТС, влияние технологии и отказов элементов в одних процессах на производительность других, связанных с ними, не учитываются. При подведении итога анализа научных трудов в области надежности строительных процессов и взаимодействия человека и техники следует отметить, что они внесли огромный вклад в решение данной проблемы и являются научной и методологической основой для дальнейших исследований в данной области.

Целью представленного исследования является выявление влияния надежности строительных рабочих на производительность комплектов землеройно-транспортной техники и его закономерностей. В качестве математического аппарата были использованы формулы теории вероятности, теории надежности, для формализации исследуемых строительных процессов применялись системы уравнений А. Н. Колмогорова и их решения, а также методы экономико-математического моделирования.

Задачей любой строительной организации является своевременная сдача построенных объектов надлежащего качества в эксплуатацию. Для того чтобы добиться положительного результата, необходимо надежное функционирование всех строительных процессов [1]. Рассмотрим, например, процесс возведения земляного полотна землеройно-транспортной техникой, а именно скреперными комплектами. Любой строительный процесс обладает всеми свойствами и признаками больших систем, поэтому к нему может быть применен системный подход. Каждая большая система включает в себя составляющие ее подсистемы [2].

В случае строительных систем их составляющие — это не только сложные машины и оборудование, задействованные в технологических процессах, но еще и рабочие, управляющие техникой. Поэтому такие системы и принято

называть человеко-техническими. Надежность техники, такие показатели, как вероятность безотказной работы и отказа, его продолжительность, а также время, которое потребуется на восстановление, оказывают ощутимое влияние на качество функционирования строительных процессов и производительность самой техники, работающей в комплекте [3]. Но и к деятельности человека в составе ЧТС можно применить некоторые показатели, часто применяемые к техническим системам.

Например, невыход на работу можно воспринимать как отказ, продолжительность больничного листа — как продолжительность восстановления, можно рассчитать вероятность безотказной работы и другие показатели [4]. Поэтому будет рациональным учитывать влияние на производительность комплектов строительных машин и самого процесса в целом надежности не только техники, но и рабочих, участвующих в производственном процессе.

Исследуем, какое влияние оказывает надежность строительных рабочих на производительность комплектов землеройно-транспортной техники. Для этого рассмотрим несколько таких комплектов:

- 1 скрепер и 1 бульдозер;
- 2 скрепера и 1 бульдозер;
- 4 скрепера и 2 бульдозера;
- 6 скреперов и 3 бульдозера.

Марку и вместимость ковша скрепера выберем наиболее часто используемые в транспортном строительстве: Caterpillar 613B  $q = 8,4 \text{ м}^3$ , работающие в комплекте с бульдозерами Komatsu D65EX16. Выполним расчет производительности ведущих машин в выбранных комплектах с учетом надежности строительных рабочих, при условии что техника в комплектах используется новая, поэтому, согласно статистике, вероятность безотказной работы для нее максимальна и равна 0,85, а состав рабочих может быть разнообразным по возрасту и здоровью. Вероятность их безотказной работы находится в диапазоне от максимальной до минимальной — 0,95–0,75 (с интервалом 0,05) для расстояния дальности возки грунта 0,5–2,0 км (с интервалом 0,5 км). Результаты расчета представлены в таблице.

По полученным результатам построим графические зависимости (рис. 1 и 2).

Анализируя зависимости, можно сделать следующие выводы: вид графиков близок к линейному. Чем меньше расстояние дальности возки грунта, тем выше производительность скрепера. С увеличением количества скреперов в комплекте вероятность безотказной работы людей начинает оказывать все меньшее влияние на производительность каждого конкретного скрепера [5]. Так, например, при изменении вероятности безотказной работы людей с 0,75 до 0,95 производительность скрепера, который работает в комплекте, включающем 1 скрепер и 1 бульдозер, вырастет на 12,9% при расстоянии дальности возки грунта 0,5 км.

**ТАБЛИЦА. Производительность скреперов Caterpillar 613В  $q = 8,4 \text{ м}^3$ , работающих в комплекте с бульдозерами, с учетом вероятности безотказной работы людей**

| Расстояние,<br>км                    | Производительность с учетом вероятности безотказной работы людей<br>в диапазоне 0,95–0,75, $\text{м}^3/\text{ч}$ |                 |                 |                 |                 |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                      | 0,95                                                                                                             | 0,90            | 0,85            | 0,80            | 0,75            |
| Комплект: 1 скрепер и 1 бульдозер    |                                                                                                                  |                 |                 |                 |                 |
| 0,5                                  | 317,8                                                                                                            | 307,1           | 297,5           | 289,0           | 281,3           |
| 1,0                                  | 153,9                                                                                                            | 148,8           | 144,1           | 140,0           | 136,3           |
| 1,5                                  | 75,8                                                                                                             | 73,3            | 70,9            | 68,9            | 67,1            |
| 2,0                                  | 57,6                                                                                                             | 55,6            | 53,9            | 52,3            | 50,9            |
| Комплект: 2 скрепера и 1 бульдозер   |                                                                                                                  |                 |                 |                 |                 |
| 0,5                                  | 326,3<br>652,5                                                                                                   | 318,2<br>636,4  | 311,3<br>622,6  | 305,1<br>610,3  | 300,2<br>600,3  |
| 1,0                                  | 158,1<br>316,2                                                                                                   | 154,2<br>308,4  | 150,8<br>301,7  | 147,9<br>295,7  | 145,4<br>290,9  |
| 1,5                                  | 77,8<br>155,7                                                                                                    | 75,9<br>151,8   | 74,3<br>148,5   | 72,8<br>145,6   | 71,6<br>143,2   |
| 2,0                                  | 59,1<br>118,2                                                                                                    | 57,6<br>115,3   | 56,4<br>112,8   | 55,3<br>110,5   | 54,4<br>108,7   |
| Комплект: 4 скрепера и 2 бульдозера  |                                                                                                                  |                 |                 |                 |                 |
| 0,5                                  | 342,8<br>1371,0                                                                                                  | 338,5<br>1354,2 | 335,5<br>1341,9 | 332,8<br>1331,1 | 330,5<br>1321,9 |
| 1,0                                  | 166,1<br>664,3                                                                                                   | 164,0<br>656,1  | 162,5<br>650,2  | 161,2<br>644,9  | 160,1<br>640,5  |
| 1,5                                  | 81,8<br>327,1                                                                                                    | 80,8<br>323,1   | 80,0<br>320,1   | 79,4<br>317,6   | 78,8<br>315,4   |
| 2,0                                  | 62,1<br>248,3                                                                                                    | 61,3<br>245,3   | 60,8<br>243,0   | 60,3<br>241,1   | 59,9<br>239,4   |
| Комплект: 6 скреперов и 3 бульдозера |                                                                                                                  |                 |                 |                 |                 |
| 0,5                                  | 350,8<br>2104,9                                                                                                  | 348,5<br>2091,1 | 346,6<br>2079,6 | 345,1<br>2070,4 | 343,9<br>2063,5 |
| 1,0                                  | 169,9<br>1019,9                                                                                                  | 168,9<br>1013,2 | 167,9<br>1007,6 | 167,2<br>1003,2 | 166,6<br>999,8  |
| 1,5                                  | 83,7<br>502,2                                                                                                    | 81,3<br>498,9   | 82,7<br>496,1   | 82,3<br>493,9   | 82,0<br>492,3   |
| 2,0                                  | 63,5<br>381,2                                                                                                    | 63,1<br>378,7   | 62,8<br>376,7   | 62,5<br>374,9   | 62,3<br>373,7   |

*Примечание:* верхняя цифра в ячейке «Производительность» — производительность одного (каждого) скрепера в комплекте, нижняя цифра — производительность комплекта.

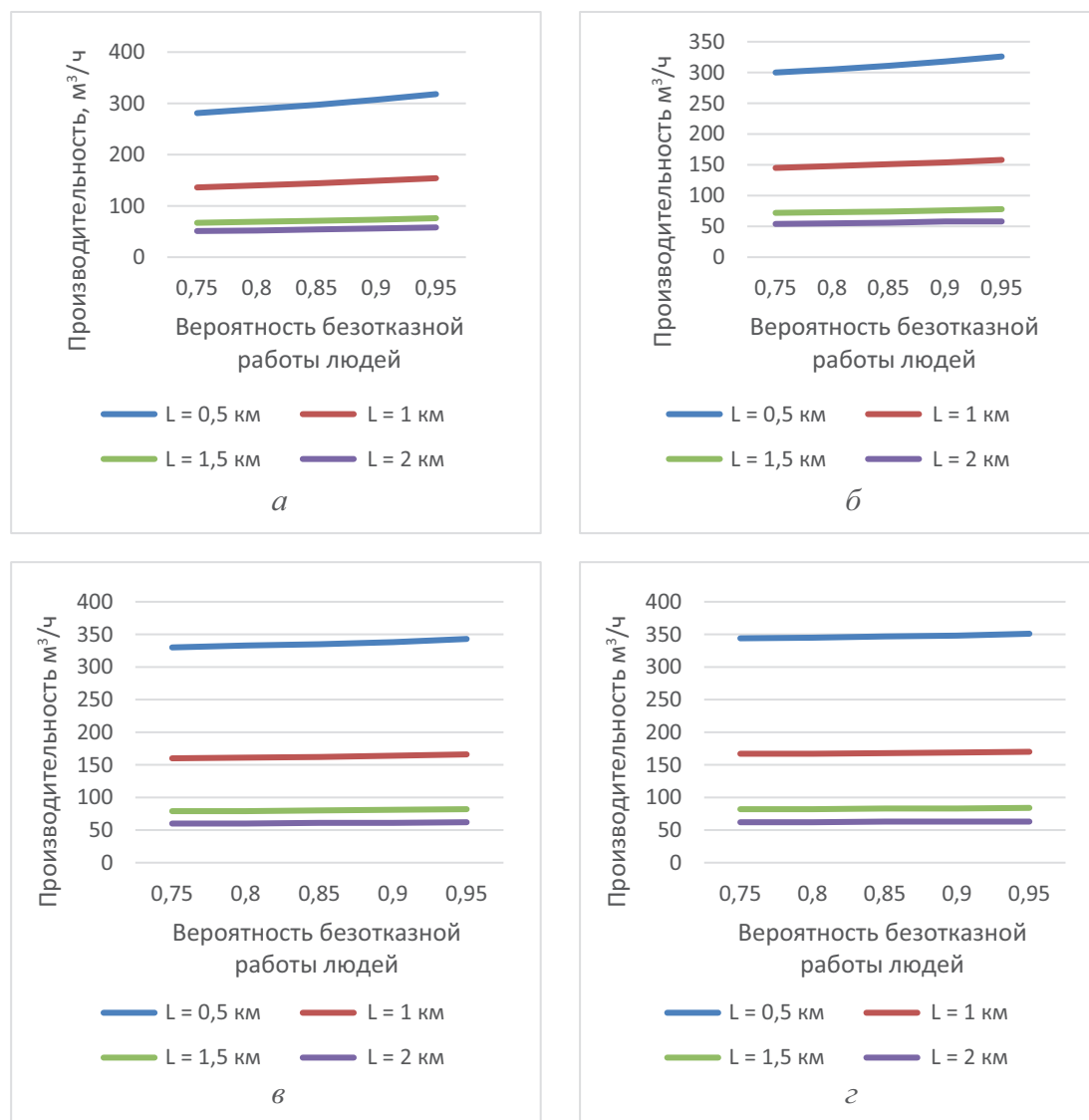


**Рис. 1.** Производительность одного (каждого) скрепера с учетом надежности людей, работающего в комплекте: *а* — 1 скрепер и 1 бульдозер; *б* — 2 скрепера и 1 бульдозер; *в* — 4 скрепера и 2 бульдозера; *г* — 6 скреперов и 3 бульдозера

При тех же условиях, но в комплекте из 2 скреперов и 1 бульдозера производительность каждого скрепера вырастет на 8,7%, в комплекте из 4 скреперов и 2 бульдозеров — уже на 3,7%, а в комплекте из 6 скреперов и 3 бульдозеров — только на 2%. Причем увеличение дальности возки грунта практически не меняет влияние надежности людей на производительность скреперов [6]. При дальности возки грунта 2 км для тех же самых комплектов возрастание производительности будет на 13,2; 8,6; 3,7 и 1,9% соответственно.

Получается, что чем больше машин с машинистами задействовано в комплекте, тем меньшее влияние оказывает надежность отдельно взятых рабочих на производительность каждой машины в комплекте за счет резервирования людей и техники [7].

На рис. 2 показаны зависимости производительности скреперных комплектов с учетом надежности людей при вероятности безотказной работы машинистов 0,75–0,85 для вышеуказанных комплектов при дальности возки грунта 0,5–2 км.

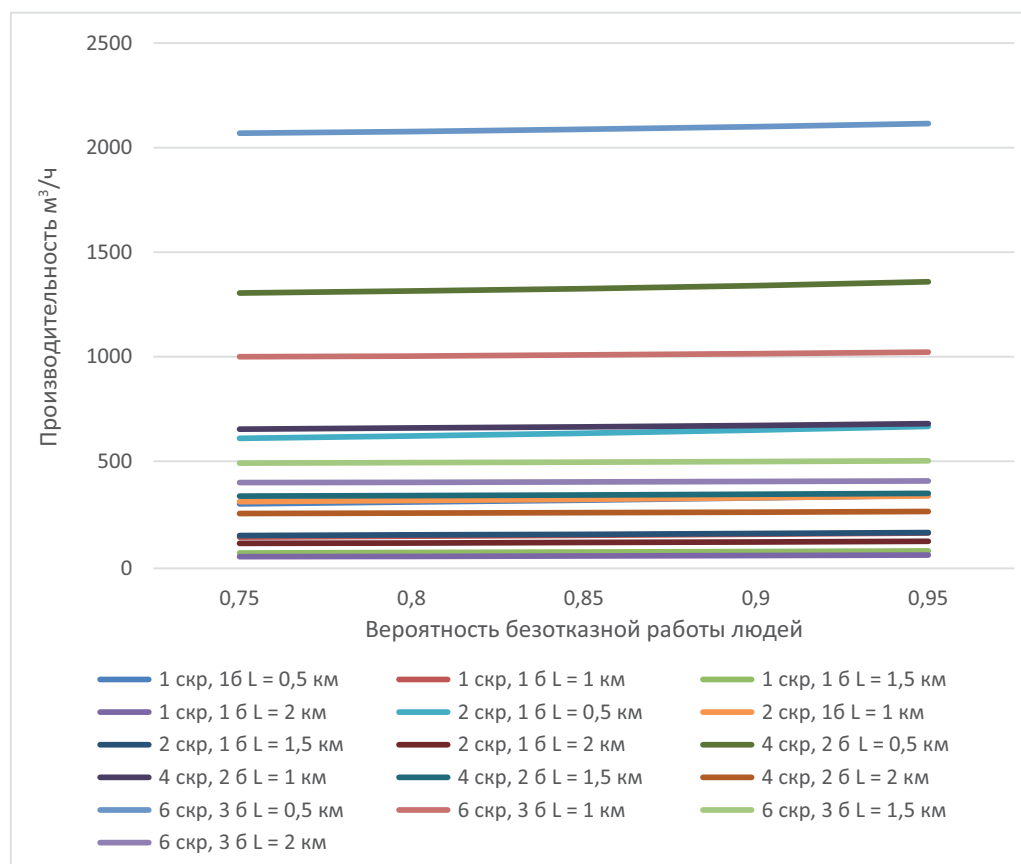


**Рис. 2.** Производительность скреперных комплектов с учетом надежности людей для комплектов: 1 скрепер и 1 бульдозер, 2 скрепера и 1 бульдозер, 4 скрепера и 2 бульдозера, 6 скреперов и 3 бульдозера при дальности возки грунта 0,5–2 км

Исследуя полученные зависимости, видим, что производительность комплектов машин становится тем выше, чем больше в комплекте машин и чем меньше расстояние дальности возки. Производительность комплекта меньше подвержена влиянию вероятности безотказной работы людей, чем больше машин в комплекте [8]. Кроме того, можно обратить внимание на то, что некоторые комплекты машин при определенных условиях оказываются конкурентоспособными по производительности [9].

Например, близкую по значениям производительность имеют комплекты, состоящие:

- из 2 скреперов и 1 бульдозера при  $L = 1$  км; 1 скрепера и 1 бульдозера при  $L = 0,5$  км;
- из 1 скрепера, 1 бульдозера при  $L = 1$  км; 2 скреперов и 1 бульдозера при  $L = 1,5$  км;

- из 2 скреперов и 1 бульдозера при  $L = 0,5$  км; 4 скреперов и 2 бульдозеров при  $L = 1$  км;
- из 4 скреперов и 2 бульдозеров при  $L = 1,5$  км; 2 скреперов и 1 бульдозера при  $L = 0,7$  км.

То есть определив комплекты, которые могут работать с одинаковой производительностью, можно добиться выбора строительной техники, которая при правильной организации даст возможность выполнить все необходимые работы в заданные сроки, не сорвав их, даже если у производителя в наличии несколько однотипных машин и нет возможности использовать разные марки и типоразмеры техники. Если же выполнить подобный расчет для нескольких марок и типоразмеров скреперов, то можно получить внушительный список конкурентоспособной техники для использования строительными организациями [10]. Но даже данные графических зависимостей, приведенные на рис. 1 и 2, дают представление, какую производительность будет иметь каждая машина в комплекте и комплект в целом при заданной дальности возки грунта и при определенной вероятности безотказной работы машинистов.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы: надежность рабочих оказывает не меньшее влияние на производительность комплектов строительной техники, чем надежность самой техники. При этом чем меньше одноименных скреперов работает в комплекте техники, тем значительнее влияние надежности рабочих на производительность каждой из машин и наоборот: чем больше одноименных машин в комплекте, тем слабее влияние надежности на производительность каждой машины. Определены комплекты машин, при определенных условиях конкурирующих по производительности. Полученные результаты позволяют оценить влияние надежности рабочих в комплектах строительной техники и повысить производительность как самих комплектов, так и каждой машины в них, а также могут быть полезны руководителям организаций в области транспортного строительства при формировании комплектов техники для реализации строительных процессов.

### Список источников

1. Информационные модели функциональных систем / под ред. К. В. Судакова и А. А. Гусакова. М.: Фонд «Новое тысячелетие», 2004. 304 с.
2. Гусаков А. А., Гинзбург А. В., Веремеенко С. А. Организационно-технологическая надежность строительства. М.: Внешторгиздат, 1994. 472 с.
3. Гусаков А. А., Монфред Ю. Б., Прыкин Б. В. Моделирование организационно-технологической надежности строительства. М.: SVR-Аргус, 1994. 472 с.
4. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 704 с.
5. Спиридонов Э. С., Максимов А. В. Научные основы оптимизации организации и управления комплексом работ по переустройству транспортных объектов. М.: Известия, 1998. 290 с.

6. Дроздова Н.В. Экономико-математическое моделирование. Ярославль: ЯрГУ, 2010. 246 с.
7. Катарыгин Н.В. Экономико-математическое моделирование. СПб.: Лань, 2022. 256 с.
8. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах. СПб.: Лань, 2011. 352 с.
9. Панченко Н.М., Басовский Д.А. Влияние надежности элементов строительного процесса на сроки строительства // Бюллетень результатов научных исследований. 2025. № 3. С. 167–175.
10. Панченко Н.М., Басовский Д.А. К вопросу выбора наиболее рационального сочетания землеройной и транспортной техники при производстве земляных работ // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 1. С. 19–25.

Дата поступления: 25.06.2026

Решение о публикации: 08.07.2026

#### Контактная информация:

ПАНЧЕНКО Наталия Михайловна — кандидат техн. наук, доцент; [panchnat@rambler.ru](mailto:panchnat@rambler.ru)

## The Influence of the Reliability of Construction Workers on the Productivity of Sets Of Earthmoving and Transport Equipment

**N. M. Panchenko**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** *Panchenko N. M. The Influence of the Reliability of Construction Workers on the Productivity of Sets of Earthmoving and Transport Equipment // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 197–205. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-197-205 (In Russian)*

#### Abstract

**Objective:** to ensure high-quality construction products within the time frame set by the project, effective functioning of construction processes is necessary. The construction time directly depends on the performance of the machinery involved in the construction process. Performance is influenced by many different factors. A number of factors are taken into account in the regulatory documentation. However there are also those that are not taken into account, for example, the reliability of construction workers. The purpose of this study is to identify the impact of the reliability of construction workers on the performance of construction machinery and its patterns. **Methods:** methods of economic and mathematical modeling were used, calculations were performed using formulas from reliability theory, probability theory, and queuing theory. **Results:** the productivity of sets of earthmoving and transport equipment and individual machines in sets is determined, taking into account the reliability of workers. Based on the calculation results, graphical dependences of the productivity of sets of equipment and individual machines in sets are constructed, taking into account the reliability of workers for a ground transportation range of 0.5–2 km of ground transportation. The influence of the reliability of construction workers on the productivity of construction machinery and its patterns is revealed. **Practical significance:** the results obtained can be useful to the heads of organizations in the field of transport construction. They will help to assess the organization's ability to perform specified amounts of work efficiently and on time, taking into account such an important factor as the impact of the reliability of construction workers on the productivity of machinery.

**Keywords:** reliability, failure, recovery, probability of uptime, productivity, construction process, scraper, bulldozer

## References

1. Informatsionnye modeli funktsionalnykh sistem [Information Models of Functional Systems] / ed. by A. A. Gusakov, Sudakov K. V. Moscow, Foundation “Novoe Tysyacheletie”, 2004, 304 p. (In Russian)
2. Gusakov A. A., Ginzburg A. V., Veremeenko S. A. Organizatsionno-tekhnologicheskaya nadezhnost' stroitelstva [Organizational and Technological Reliability of Construction], Moscow, Vneshtorgizdat [Foreign Trade Publishing House], 1994, 472 p. (In Russian)
3. Gusakov A. A., Monfred Yu. B., Prykin B. V. Modelirovanie organizatsionno-tekhnologicheskoy nadezhnosti stroitelstva [Modeling Organizational and Technological Reliability of Construction], Moscow, SVR-Argus, 1994, 472 p. (In Russian)
4. Polovko A. M., Gurov S. V. Osnovy teorii nadezhnosti [Fundamentals of Reliability Theory], St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2008, 704 p. (In Russian)
5. Spiridonov E. S., Maksimov A. V. Nauchnye osnovy optimizatsii organizatsii i upravleniya kompleksom rabot po pereustroystvu transportnykh obektov [Scientific Foundations for Optimizing the Organization and Management of Work Complexes for the Reconstruction of Transport Facilities], Moscow, Izvestiya [Izvestia], 1998, 290 p. (In Russian)
6. Drozdova N. V. Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie [Economic and Mathematical Modeling], Yaroslavl, YarGU [Yaroslavl State University], 2010, 246 p. (In Russian)
7. Katarygin N. V. Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie [Economic and Mathematical Modeling], St. Petersburg, Lan' [Lan Publishing House], 2022, 256 p. (In Russian)
8. Akulich I. L. Matematicheskoe programmirovaniye v primerakh i zadachakh [Mathematical Programming in Examples and Problems], St. Petersburg, Lan' [Lan Publishing House], 2011, 352 p. (In Russian)
9. Panchenko N. M., Basovskiy D. A. Vliyanie nadezhnosti elementov stroitel'nogo protsessa na sroki stroitelstva [The Influence of the Reliability of Construction Process Elements on Construction Timelines], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of Scientific Research Results]*, 2025, no. 3, pp. 167–175. (In Russian)
10. Panchenko N. M., Basovskiy D. A. K voprosu vybora naibolee ratsional'nogo sochetaniya zemleroy noy i transportnoy tekhniki pri proizvodstve zemlyanykh rabot [On the Issue of Selecting the Most Rational Combination of Earthmoving and Transport Equipment for Earthwork Operations], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of Scientific Research Results]*, 2023, no. 1, pp. 19–25. (In Russian)

Received: June 25, 2026

Accepted: July 08, 2026

## Author's information:

Nataliya M. PANCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; panchnat@rambler.ru