Тип статьи: научная
УДК 631.1
DOI: 10.35887/2305-2538-2023-2-135-147

ТРУДОЕМКОСТЬ РЕМОНТНЫХ РАБОТ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ТЕХНИКИ

Алексей Алексеевич Бородин [1], Юрий Викторович Родионов [2], Александр Егорович Ломовских [3], Василий Сергеевич Январев [4], Евгений Андреевич Деревянко [5], Анастасия Игоревна Скоморохова[6]

[1,3,4,5] *ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж, Россия*
[3]lomovskih1979@yandex.ru
[4]leader531@rambler.ru
[2,6] *Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия*
[2]*Мичуринский государственный аграрный университет, г. Мичуринск, Россия*
[2]rodionow.u.w@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-9601-9555
[6]nasta373@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5330-330X

Автор ответственный за переписку: Александр Егорович Ломовских, lomovskih1979@yandex.ru Corresponding author Alexander Lomovskih, lomovskih1979@yandex.ru

Реферат. *Управление техническим состоянием машинно-тракторного парка, с целью обеспечения его достаточной работоспособности и исправности, предлагается реализовывать на основе научно обоснованной системы ремонта автотракторной техники (АТ). Производственные возможности ремонтного органа, входящего в систему технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) предприятия, по восстановлению вышедшей из строя техники определены теоретическим расчётом таким образом, чтобы ремонтный орган был в состоянии отремонтировать неисправную технику в кратчайшие сроки и в полном объёме. Представлен метод теории массового обслуживания, в котором подробно изложен расчёт критериев системы ремонта предприятия. Рассмотрены два метода расчёта трудоёмкости ремонтных работ при восстановлении АТ, позволяющие определять необходимую производительность ремонтного органа, чтобы обеспечить заданный коэффициент технической готовности парка техники предприятия. Совместная реализация разработанных методов позволит расширить возможности функционирования системы ремонта предприятия, по своевременному восстановлению АТ, в зависимости от количества вышедшей из строя АТ, а также выработать теоретические основы и практические рекомендации, которые обеспечат руководству предприятий и их ремонтным органам возможности решать различные задачи. Они позволят по данным о вышедшей из строя техники определять требующееся количество и состав ремонтных бригад, данные о которых позволят определять возможности ремонтного органа по восстановлению техники за различные промежутки времени. По данным о количестве ремонтных бригад, их составу, имеющемуся выходу техники из строя предполагается определять время, за которое она будет восстановлена; По данным о количестве подлежащей ремонту техники и желаемой продолжительности выполнения работ предполагается определять требующееся количество и состав ремонтных бригад для её восстановления; оптимальные условия, когда рационально перевозить технику в ремонтный орган, или, наоборот, ремонтную бригаду к месту стоянки вышедшего из строя образца; определять состав требующихся для выполнения ремонтных работ технических средств.*

Ключевые слова: *коэффициент технической готовности, трудоёмкость, ремонтная бригада, статистический метод, система массового обслуживания, поток отказов, очередь на обслуживание.*

LABOR-INDUSTRY OF REPAIR WORKS DURING RESTORATION OF EQUIPMENT

***Alexey Borodin*[1], *Yuri Rodionov*[2], *Alexandr Lomovskih*[3], *Vasiliy Yanvarev*[4], *Evgeniy Derevyanko*[5], *Anastasia Skomorokhova*[6]**

[1,3,4,5] *Air force Academy named after Professor N. E Zhukovsky and Y. A. Gagarin, Voronezh, Russia*

[3]lomovskih1979@yandex.ru

[4]leader531@rambler.ru

[2]*Tambov state technical university, Tambov, Russia*

[2,6]*Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russia*

[2]rodionow.u.w@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-9601-9555

[6]nasta373@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5330-330X

Abstract. *The management of the technical condition of the machine and tractor fleet, in order to ensure its sufficient performance and serviceability, is proposed to be implemented on the basis of a scientifically based system for the repair of automotive equipment (AT). The production capabilities of the repair body, which is part of the maintenance and repair (M&R) system of the enterprise, for the restoration of failed equipment are determined by theoretical calculation in such a way that the repair body is able to repair faulty equipment as soon as possible and in full. The method of the theory of queuing, which details the calculation of the criteria for the repair system of an enterprise, is proposed. Two methods for calculating the labor intensity of repair work during the restoration of AT, which make it possible to determine the necessary performance of the repair body in order to provide a given coefficient of technical readiness of the enterprise's fleet of vehicles, are considered. The joint implementation of the developed methods will expand the capabilities of the enterprise repair system, for the timely restoration of AT, depending on the number of failed AT, as well as develop theoretical foundations and practical recommendations that will provide the management of enterprises and their repair bodies with the ability to solve various problems. They will allow, according to the data on the failed equipment, to determine the required number and composition of repair teams, the data on which will make it possible to determine the capabilities of the repair body to restore equipment for various periods of time. Based on the data on the number of repair teams, their composition, and the existing failure of equipment, it is supposed to determine the time during which it will be restored. Based on the data on the number of equipment to be repaired and the desired duration of the work, it is supposed to determine the required number and composition of repair teams for its restoration; optimal conditions when it is rational to transport equipment to a repair body, or, conversely, a repair team to the parking lot of a failed sample; determine the composition of the technical means required for the repair work.*

Keywords: *technical readiness coefficient, labor intensity, repair team, statistical method, queuing system, failure flow, service queue.*

Для цитирования: Бородин А.А., Родионов Ю.В., Ломовских А.Е., Январев В.С., Деревянков Е.А., Скоморохова А.И. Трудоемкость ремонтых работ при восстановлении техники // Наука в центральной России Science in the central Russia. 2023. Т. 62, № 2. С. 135-147. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-135-147.

For citation: Borodin A., Rodionov Yu., Lomovskih A., Yanvarev V., Derevyanko E., Skomorokhova A. Labor-undustry of repair works during restoration of equipment. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 62(2): 135-147. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-135-147.

Введение. Интенсивная эксплуатация современного машинно-тракторного парка (МТП), представляющего собой совокупность автотракторных средств (АТС), энергетических средств (ЭС), вспомогательных устройств и др., приводит к выходу их из строя, что в свою очередь отражается на сроках и качестве выполнения задач, стоящих перед сельскохозяйственным предприятием (СХП). Для своевременного и успешного достижения стоящих перед СХП задач, техническая готовность МТП должна находиться на достаточно высоком уровне, что

подразумевает создание эффективно функционирующей системы технического обслуживания и ремонта.

Таким образом, управление техническим состоянием АТС, ЭС и др. в сельском хозяйстве осуществляется на базе научно обоснованной системы технического обслуживания и ремонта, позволяющей обеспечивать достаточную работоспособность и исправность машин.

Комплексная система технического обслуживания и ремонта МТП предназначена для решения следующих основных задач.

1) Повышение производительности труда в сельском хозяйстве и увеличение производства продукции на основе обеспечения надлежащей технической готовности машин (в том числе тракторов) при минимальных трудовых и денежных затратах на эти цели.

2) Улучшение организации и повышение качества работ по техническому обслуживанию и ремонту АТС, обеспечение их надлежащей сохранности и продления сроков их службы.

3) Оптимизация структуры и состава ремонтно-обслуживающей базы (РОБ), ее сбалансированного развития в условиях современного агропромышленного комплекса (АПК).

4) Ускорение научно-технического прогресса при эксплуатации МТП.

Ремонтно-обслуживающая база предназначена для проведения ремонта и технического обслуживания машин, при наличии необходимых средств технического оснащения и обслуживающего персонала.

Техническое оснащение РОБ включает совокупность соответствующего оборудования, приспособлений и инструмента, предназначенных для механизации процессов ремонта и технического обслуживания машин предприятия. Ремонтно-обслуживающая база должна соответствовать техническому уровню машин и полностью удовлетворять потребности в техническом обслуживании и ремонте (ТО и Р) при минимальных затратах труда и средств [1].

Материалы и методы. Производственные возможности ремонтного органа, входящего в систему ТО и Р предприятия, по восстановлению вышедшей из строя техники должны быть определены с таким расчётом, чтобы ремонтный орган был в состоянии отремонтировать неисправную технику в кратчайшие сроки и в полном объеме. Изложению решения данного вопроса посвящена настоящая статья.

1. Определение количества и состава ремонтных бригад статическим методом. Производственные возможности ремонтного органа определяются их производительностью – количеством выполненных ремонтов за определенное календарное время $T_{\text{к}}$ (сутки, неделю, месяц, год).

Производительность специалиста-ремонтника, ремонтной бригады и отделения, мастерской или ремонтного органа это их возможности по выполнению определённого объема (перечня) ремонтных работ за единицу времени. Численно производительность равна количеству выполняемых ремонтных операций или работ в единицу времени. Следовательно, по определению производительность есть интенсивность ремонтов μ.

Производительность как характеристика ремонтного органа определяется уровнем квалификации специалистов-ремонтников, структурой построения технологического процесса и обеспеченностью каждого рабочего места, ремонтного участка и ремонтного органа всем необходимым для успешного выполнения работ [2–6]. Она характеризует достигнутый организационно-технический уровень и качество технологического процесса производства ремонта, а также возможности ремонтного органа по выполнению восстановительных работ на неисправной технике.

Для восстановления работоспособности техники в каждом конкретном случае назначается ремонтная бригада. Состав ремонтной бригады определяется на основе данных о трудозатратах на производство данного вида ремонта.

Зная трудоемкость выполнения текущего ($T_{\text{тр}}^{\text{т}}$), среднего ($T_{\text{тр}}^{\text{с}}$) и капитального ($T_{\text{тр}}^{\text{к}}$) ремонтов, можем определить необходимое количество специалистов-ремонтников для выполнения данного вида ремонта: $N_{\text{рем}}^{\text{т}}$ – на текущий ремонт, $N_{\text{рем}}^{\text{с}}$ – на средний ремонт, $N_{\text{рем}}^{\text{к}}$ – на капитальный ремонт) по формуле:

$$N^{i}_{\text{рем}} = \frac{T^{i}_{\text{тр}}}{t_{\text{рд}} \cdot K_{\text{рс}} \cdot Д \cdot \eta_{\text{рв}}}, \quad (1)$$

где $i = \text{т, с, к}$ – индексы текущего, среднего и капитального ремонтов; $T^{i}_{\text{тр}}$ – трудоемкость текущего, среднего и капитального ремонтов соответственно; $t_{\text{рд}}$ – продолжительность рабочего дня одной смены; $K_{\text{рс}}$ – планируемое количество смен для выполнения работ в течение одних суток; Д – число рабочих суток (дней), отводимых на выполнение работ согласно плану; $\eta_{\text{рв}}$ – коэффициент потерь рабочего времени за одну смену.

Распределение привлекаемых для выполнения работ ремонтников по специальностям в составе ремонтной бригады определяется по формуле:

$$N_{\text{рем}\,j} = N^{i}_{\text{рем}} \cdot C_j, \quad (2)$$

где $N^{i}_{\text{рем}}$ – количество ремонтников в i-й ремонтной бригаде, которое определяется по формуле (1); C_j – коэффициент, учитывающий ту часть общих трудозатрат в %, которую выполняют ремонтники *j*-й специальности; $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ – номера индексов коэффициента C_j, показанные в таблице 1.

Распределение трудозатрат по видам ремонтных работ, выполняемых на технике, представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение трудозатрат по видам ремонтных работ, выполняемых на технике

№ п/п	Наименование видов ремонтных работ	Обозначение коэффициента C_j	% трудозатрат
1	Механические и слесарные работы	C_1	25
2	Кузнечные, правочные и газосварочные работы	C_2	15
3	Ремонт блоков, узлов и агрегатов	C_3	25
4	Электротехнические и электромеханические работы	C_4	15
5	Настройка и стыковка блоков, узлов и агрегатов специального оборудования в целом	C_5	15
6	Вспомогательные, подготовительные и регулировочные работы	C_6	5
		Итого:	100%

Число включаемых в состав ремонтной бригады вспомогательного рабочего и административно-хозяйственного персонала в каждом конкретном случае определяется начальником ремонтного органа.

Количество текущих $N^{\text{т}}_{\text{рв}}$, средних $N^{\text{с}}_{\text{рв}}$, капитальных $N^{\text{к}}_{\text{рв}}$ ремонтов, которое может выполнить данный ремонтный орган за время $\overline{T}_{\text{рв}}$, определяется по формуле:

$$N^{i}_{\text{рв}} = \mu_i \cdot \overline{T}_{\text{рв}} = \frac{\overline{T}_{\text{рв}}}{T^{i}_{\text{цр}}}, \quad (3)$$

где $i = \text{т, с, к}$ – индексы видов ремонтов; $\overline{T}_{\text{рв}}$ – среднее время ремонта; $N^{i}_{\text{рв}}$ – количество текущих, средних, капитальных ремонтов, которое может выполнить за время $T_{\text{рв}}$ ремонтный орган (ремонтная бригада), обладающий производительностью (интенсивностью ремонтов), равной μ_i.

Если во время эксплуатации вышла из строя и требует текущего, среднего, капитального ремонтов $N^{i}_{\text{АТ}}$ например, автотракторная техника (АТ), то для их восстановления потребуется $n^{i}_{\text{рб}}$

ремонтных бригад. Так как одна ремонтная бригада может отремонтировать $N^i_{\text{рв}}$ автотракторной техники, то $n^i_{\text{рб}}$ смогут отремонтировать $n^i_{\text{рб}} \cdot N^i_{\text{рв}} = N^i_{\text{АТ}}$. Следовательно, с учетом (3), получим:

$$n^i_{\text{рб}} = \frac{N^i_{\text{АТ}}}{N^i_{\text{рв}}} = \frac{N^i_{\text{АТ}}}{T_{\text{рв}} \cdot \mu_i}, \quad (4)$$

Состав каждой ремонтной бригады определяется по формулам (1) и (2).

Уравнения (1) – (4) позволяют определять:

- необходимое число ремонтных бригад для выполнения ремонта $N^i_{\text{АТ}}$ по заданным $\overline{T}_{\text{рв}}$ и μ_i;

-продолжительность времени $\overline{T}_{\text{рв}}$ выполнения ремонта $N^i_{\text{АТ}}$ по заданным $n^i_{\text{рб}}$ и μ_i.

Предложенные расчетные формулы основаны на статистических нормах затрат времени на производство ремонтных работ. При выводе этих формул не учитывалась динамика поступления АТ в ремонт и динамика функционирования системы ремонта. Поэтому полученные по приведенным формулам данные являются первым приближением и рекомендуются для проведения технических расчетов при оценке возможностей ремонтного органа по восстановлению неисправной (требующей ремонта) АТ.

2. Определение количества и состава ремонтных бригад методами теории массового обслуживания. Процесс эксплуатации АТ предприятием характеризуется множеством случайных, меняющихся по произвольным законам, условий и потоков событий, основными из которых являются:

- потоки отказов элементов, из которых изготовлена АТ;
- изменение метеоусловий, которые оказывают влияние на надежность работы АТ;
- различная профессиональная подготовка механиков и водителей;
- различная степень специального оборудования и различных условий расположения АТ на местности;
- различные условия работы и обеспеченность предприятия и его ремонтного органа всем необходимым для восстановления неисправной АТ и многие другие [7].

Совокупность всех этих случайных событий и условий придает всем процессам работы предприятия вероятностный характер, и для оценки происходящих во времени этих процессов, в том числе, работы по восстановлению АТ, наиболее приемлемы вероятностные оценки.

Существующая система ремонтного органа предприятия по характеру протекающих в них процессов смены состояний являются типичными системами массового обслуживания (СМО). Обслуживающими аппаратами при выполнении восстановлений АТ являются ремонтные органы и отдельные ремонтники. Входящими потоками требований в эти СМО являются потоки отказов и эксплуатационных неисправностей АТ. Выходящие из системы потоки составляют отремонтированные узлы, агрегаты, механизмы и АТ в целом.

Система ремонта предприятия является пуассоновской СМО. По своей структуре она является замкнутой СМО, так как источники требований на ремонт АТ входят в состав самой системы, и интенсивность потока требований зависит от состава обслуживаемой группы АТ (трактор, автомобиль и др.).

Автотракторная техника или ее отдельные части, как элементы СМО, могут находиться в одном из трех состояний (рисунок 1): рабочем, в очереди на обслуживание (на ремонт), на обслуживании (на ремонте).

При исследовании модели замкнутой СМО принимаем, что группа АТ состоит из $N_{\text{АТ}}$ автотракторной техники.

Характеристиками качества замкнутых СМО являются следующие показатели:

а) коэффициент технической готовности группы АТ, или вероятность того, что АТ находится в исправном состоянии:

$$K^{\text{г}}_{\text{тг}} = 1 - \frac{\overline{r} + \overline{s}}{N_{\text{АТ}}} = 1 - \frac{\overline{N}_{\text{пр}}}{N_{\text{АТ}}}, \quad (5)$$

где $\overline{N}_{\text{ор}} = \overline{r}$ – среднее число АТ в очереди на ремонт; $\overline{N}_{\text{нр}} = \overline{s}$ – среднее число АТ на ремонте; $\overline{N}_{\text{пр}} = \overline{r} + \overline{s}$ – количество неисправной АТ.

б) коэффициент простоя АТ в неисправном состоянии, или вероятность ее неисправного состояния (нахождения в ремонтном органе):

$$\varepsilon_{\text{с}} = \frac{\overline{r} + \overline{s}}{N_{\text{АТ}}} = 1 - K_{\text{тг}}^{\text{г}} . \quad (6)$$

в) вероятность того, что АТ находится в очереди на ремонт:

$$\varepsilon_{\text{о}} = \frac{\overline{r}}{N_{\text{АТ}}} = \frac{N_{\text{ор}}}{N_{\text{АТ}}} . \quad (7)$$

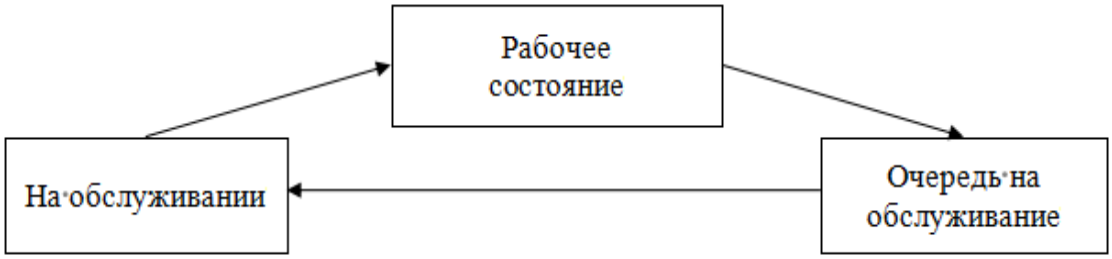

Рисунок 1 – Модель замкнутой системы массового обслуживания

Система ремонта может находиться в следующих состояниях: работы – при производстве ремонта, простоя – при отсутствии требований на ремонт.

Производственные возможности системы ремонтного органа предприятия на практике оцениваются следующими показателями [4]:

а) коэффициентом, или вероятностью, простоя АТ в очереди на ремонт $\varepsilon_{\text{о}}$, который определяется по формуле (7);

б) коэффициентом, или вероятностью, простоя ремонтного органа (ремонтной бригады, мастерской, отдельного ремонтника) без работы $\varepsilon_{\text{б}}$, который равен отношению среднего числа простаивающих бригад $\overline{n}_{\text{р б пр}}$ без работы к их числу $n_{\text{р б}}$ в данной системе ремонта:

$$\varepsilon_{\text{б}} = \frac{\overline{n}_{\text{р б пр}}}{n_{\text{р б}}} . \quad (8)$$

При выводе аналитических зависимостей для оценки эффективности функционирования системы ремонта предприятия полагаем, что вся АТ имеет примерно равные (сравнимые по величине) интенсивности отказов и эксплуатационных неисправностей $\lambda_{\text{э н}}$. Тогда суммарная интенсивность эксплуатационных неисправностей АТ в группе определяется по формуле:

$$\Lambda_{\text{э н}} = (N_{\text{АТ}} - N_{\text{пр}})\lambda_{\text{э н}} , \quad (9)$$

где $N_{\text{пр}}$ – текущее значение количества АТ, имеющей неисправности.

Производительность всей системы ремонта μ_{Σ} определяется через производительность одной, взятой за эталон, ремонтной бригады по формуле:

$$\mu_{\Sigma} = n_{\text{р б}} \cdot \mu , \quad (10)$$

где $n_{\text{р б}}$ – число ремонтных бригад; μ – интенсивность ремонтов одной ремонтной бригады.

При этих условиях работа такой системы ремонта, как замкнутая СМО, описывается следующей системой алгебраических уравнений:

$$\left.\begin{array}{c} N_{\text{АТ}} \cdot \lambda \cdot P_{\text{о}} = \mu \cdot P_1; \\ [(N_{\text{АТ}} - N_{\text{пр}}) \cdot \lambda + \mu \cdot N_{\text{пр}}] \cdot P_N = (N_{\text{АТ}} - N_{\text{пр}} + 1) \cdot \lambda \cdot P_{N-1} + (N_{\text{пр}} + 1) \cdot \mu \cdot P_{N-1} \\ \text{при } 0 < N_{\text{пр}} < n_{\text{р б}}; \\ [(N_{\text{АТ}} - N_{\text{пр}}) \cdot \lambda + n_{\text{р б}} \cdot \mu] \cdot P_N = (N_{\text{АТ}} - N_{\text{пр}} + 1) \cdot \lambda \cdot P_{N-1} + n_{\text{р б}} \cdot \mu \cdot P_{N+1} \\ \text{при } n_{\text{р б}} < N_{\text{пр}} < N_{\text{АТ}}; \\ \lambda \cdot P_{N-1} = n_{\text{р б}} \cdot \mu \cdot P_{N\,\text{АТ}} \end{array}\right\}, \tag{11}$$

где P_N – вероятность поступления N АТ и ее отдельных элементов, узлов, агрегатов и механизмов в ремонтный орган.

Решая эту систему при условии, что $\sum_{N=0}^{N_{\text{АТ}}} P_N = 1$, определяем следующие основные характеристики системы ремонтного органа предприятия:

а) вероятность появления $N_{\text{пр}}$ неисправной автотракторной техники и ее отдельных элементов, узлов, агрегатов и механизмов в системе ремонта:

$$\frac{P_N}{P_{\text{о}}} = C_{N_{\text{АТ}}}^{N} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{э н}}}{\mu_{\text{э н}}}\right)^N \text{ при } 0 \le N_{\text{пр}} \le n_{\text{р б}},$$

$$\frac{P_N}{P_{\text{о}}} = \frac{N_{\text{пр}}! \left(\frac{\lambda_{\text{э н}}}{\mu_{\text{э н}}}\right)^N}{n_{\text{р б}}^{N-n_{\text{р б}}} \cdot n_{\text{р б}}!(N_{\text{АТ}} - N_{\text{пр}})} \text{ при } n_{\text{р б}} < N_{\text{пр}} \le N_{\text{АТ}}, \tag{12}$$

где λ – параметр (интенсивность) потока эксплуатационных неисправностей (отказов) автотракторной техники; μ – параметр (интенсивность) восстановлений автотракторной техники.

б) вероятность того, что вся техника исправна будет определяться по формуле:

$$P_{\text{о}} = \frac{1}{\sum_{N=0}^{n_{\text{р б}}-1} C_{N_{\text{АТ}}}^{N} \cdot n_{\text{р б}}^{N} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{э н}}}{\mu_{\text{э н}}}\right)^N + \sum_{N=n_{\text{р б}}}^{N_{\text{АТ}}} C_{N_{\text{АТ}}}^{N} \cdot \frac{N! n_{\text{р б}}^{n_{\text{р б}}}}{n_{\text{р б}}!} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{э н}}}{\mu_{\text{э н}}}\right)^N}. \tag{13}$$

в) среднее число автотракторной техники в очереди на ремонт определяется по формуле:

$$\bar{r} = \overline{N}_{\text{пр}}\left(1 + \frac{n_{\text{р б}} \cdot \lambda_{\text{э н}}}{\mu_{\text{э н}}}\right) - \frac{N_{\text{АТ}} \cdot n_{\text{р б}} \cdot \lambda_{\text{э н}}}{\mu_{\text{э н}}}. \tag{14}$$

г) среднее число простаивающих ремонтных бригад без работы определяется по формуле:

$$\bar{n}_{\text{р б пр}} = \frac{n_{\text{р б}} \cdot \lambda_{\text{э н}} \cdot (\overline{N}_{\text{пр}} - N_{\text{АТ}})}{\mu_{\text{э н}}} + n_{\text{р б}}. \tag{15}$$

д) среднее число автотракторной техники на ремонте определяется по формуле:

$$\bar{s} = \frac{(N_{\text{АТ}} - \overline{N}) \cdot n_{\text{р б}} \cdot \lambda_{\text{э н}}}{\mu_{\text{э н}}}. \tag{16}$$

е) вероятность, или коэффициент, простоя ремонтной бригады без работы определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{б}} = \frac{\bar{n}_{\text{р б пр}}}{n_{\text{р б}}} = 1 - \frac{\lambda_{\text{э н}} \cdot (N_{\text{АТ}} - \overline{N})}{\mu_{\text{э н}}}. \tag{17}$$

ж) вероятность, или коэффициент, простоя автотракторной техники в очереди на ремонт определяется следующим образом:

$$\varepsilon_{\text{о}} = \frac{\bar{r}}{N_{\text{АТ}}} = \frac{\overline{N}_{\text{пр}}}{N_{\text{АТ}}} \cdot \left(1 + \frac{n_{\text{р б}} \cdot \lambda_{\text{э н}}}{\mu_{\text{э н}}}\right) - \frac{n_{\text{р б}} \cdot \lambda_{\text{э н}}}{\mu_{\text{э н}}}. \tag{18}$$

Результаты и их обсуждение. Представленные выше уравнения справедливы при установившемся режиме работы СМО, который имеет место при любых $\lambda_{эн}$ и $\mu_{эн}$, так как СМО является замкнутой. Сходимость процесса к установившемуся режиму определяется отношением:

$$\frac{\lambda_{эн}}{\mu_{эн}} < 1. \quad (19)$$

Естественно, что чем меньше $\varepsilon_о$ и $\varepsilon_б$, тем более экономично, эффективно и рационально построена система ремонта. Поэтому $\varepsilon_о$ и $\varepsilon_б$ являются одними из основных показателей качества системы ремонта предприятия.

Для оценки качества функционирования, оптимизации структуры и состава системы ремонта предприятия целесообразно использовать следующие критерии:

- коэффициент технической готовности группы АТ $K_{тг}^{г}$ и отдельного образца АТ входящей в ее группу $K_{тг}$;

- коэффициент простоя АТ в ремонтном органе в ожидании очереди на ремонт $\varepsilon_о$;

- коэффициент простоя ремонтной бригады (ремонтного органа) без работы $\varepsilon_б$;

- коэффициент простоя АТ в неисправном состоянии в ремонтном органе $\varepsilon_с$;

- коэффициент простоя (нахождения) АТ в неисправном состоянии при транспортировке в ремонт (или ремонтной бригады к месту стоянки неисправной АТ) $\varepsilon_т$ [3, 5].

Система ремонта предприятия по своему составу и возможностям будет оптимальной в том случае, если она обеспечивает:

1) заданный уровень (значение) коэффициента технической готовности группы АТ предприятия $K_{тг}^{г}$;

2) минимальное значение коэффициентов простоя АТ в очереди на ремонт, при транспортировке в ремонт и ремонтной бригады без работы – $\varepsilon_о$, $\varepsilon_т$ и $\varepsilon_б$.

Наиболее общей технической характеристикой состояния АТ, а также основным критерием оптимизации решения задачи по выбору оптимального числа ремонтных бригад $n_{рб}$ в системе ремонта предприятия является коэффициент технической готовности, который показывает:

а) для одной единицы АТ – относительное время (в процентах) пребывания техники в исправном состоянии $K_{тг}$;

б) для группы АТ – относительное число (в процентах) исправной АТ в течение $T_к$ – выбранного для оценки календарного времени эксплуатации техники $K_{тг}^{г}$.

Коэффициент технической готовности одной единицы АТ определяется по формуле:

$$K_г = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{\mu_{эн}}{\lambda_{эн} + \mu_{эн}}. \quad (20)$$

Коэффициент технической готовности группы АТ может быть определен через коэффициент технической готовности одной единицы АТ и коэффициент простоя техники в очереди на ремонт. Из (18), с учетом (5) после преобразований получим следующую формулу для определения коэффициента технической готовности группы АТ:

$$K_г^{г} = K_г \cdot (1 - \varepsilon_о), \quad (21)$$

где $K_{тг}$ определяется по формуле (20), а $\varepsilon_о$ – по формуле (18).

Уравнение (21) показывает, что коэффициент технической готовности группы АТ по своему значению приближается к коэффициенту технической готовности единицы АТ по мере сокращения количества АТ в очереди на ремонт (при уменьшении $\varepsilon_о$).

Сокращения очереди на входе в ремонтном органе, возможно, достигнуть за счет выбора оптимального количества ремонтных бригад на предприятии – $n_{\text{р б opt}}$ и повышения интенсивности ремонтов каждой из них – μ.

Так как рассматриваемая СМО является замкнутой, то общее количество АТ предприятия, находящихся в различных степенях технической готовности, возможно, записать формулой:

$$N_{\text{АТ}} = \overline{N}_{\text{ис}} + \overline{N}_{\text{ор}} + \overline{N}_{\text{нр}} + \overline{N}_{\text{тс}}, \tag{22}$$

где $\overline{N}_{\text{тс}}$ – среднее число АТ, находящейся в состоянии транспортировки в ремонт; $\overline{N}_{\text{ис}}$ – среднее число исправной АТ.

На основании этой формулы величину коэффициента технической готовности группы АТ возможно записать следующей формулой:

$$K_{\text{тг}}^{\text{г}} = \frac{\overline{N}_{\text{ис}}}{\overline{N}_{\text{ис}} + \overline{N}_{\text{ор}} + \overline{N}_{\text{нр}} + \overline{N}_{\text{тс}}}. \tag{23}$$

Одной из характеристик АТ по эксплуатации является $\overline{T}_{\text{пр}}$ – среднее время простоя АТ в неисправном состоянии. Чем меньше это время, тем выше её техническая готовность.

Время простоя АТ в неисправном состоянии определяется, как сумма:

- среднего времени транспортировки техники в ремонтный орган или ремонтной бригады к месту стоянки неисправной АТ $\overline{T}_{\text{т}}$;
- среднего времени пребывания АТ в очереди на ремонт $\overline{T}_{\text{ор}}$;
- среднего времени производства ремонта $\overline{T}_{\text{в}}$.

Следовательно, средняя продолжительность простоя АТ в неисправном состоянии (при транспортировке техники в ремонт и из ремонта) равна:

$$\overline{T}_{\text{нс}} = \overline{T}_{\text{в}} + \overline{T}_{\text{ор}} + 2\overline{T}_{\text{т}}. \tag{24}$$

При транспортировке ремонтной бригады к месту неисправной АТ определяется по формуле:

$$\overline{T}_{\text{нс}} = \overline{T}_{\text{в}} + \overline{T}_{\text{ор}} + \overline{T}_{\text{т}}. \tag{25}$$

Определить продолжительность простоя АТ в неисправном состоянии (в очереди и на ремонте) возможно также через коэффициент простоя $\varepsilon_{\text{с}}$ по формуле (6).

Если учесть то, что $1 - K_{\text{тг}}^{\text{г}} = \varepsilon_{\text{с}} = \dfrac{\overline{T}_{\text{нс}}}{T_{\text{к}}}$, то

$$\overline{T}_{\text{нс}} = \overline{T} \cdot (1 - K_{\text{тг}}^{\text{г}}), \tag{26}$$

где $T_{\text{к}}$ – календарное время, за которое определяется $\overline{T}_{\text{нс}}$.

Эта формула справедлива при условии, что техника после отказа немедленно поступает в ремонтный орган и на ее доставку в ремонт, подготовку к ремонту время не затрачивается.

Учет времени пребывания техники в неисправном состоянии при транспортировке в ремонт и из ремонта производится с помощью коэффициента (вероятности) простоя АТ в нерабочем состоянии при транспортировке в ремонтный орган $\varepsilon_{\text{т}}$. Величина $\varepsilon_{\text{т}}$ равна отношению среднего числа АТ, находящейся на пути в ремонтный орган и из ремонтного органа на предприятие $\overline{N}_{\text{тс}}$, к их общему числу на предприятие $N_{\text{АТ}}$, или среднего времени транспортировки техники в ремонт и из ремонта $2\overline{T}_{\text{т}}$ к продолжительности времени эксплуатации АТ $T_{\text{к}}$, за которое производится оценка системы ремонта. Следовательно, величина $\varepsilon_{\text{т}}$ для случая транспортировки АТ в ремонт определяется формулой:

$$\varepsilon_{\text{т}} = \frac{\overline{N}_{\text{тс}}}{N_{\text{АТ}}} = \frac{2\overline{T}_{\text{т}}}{T_{\text{к}}}. \tag{27}$$

При транспортировке ремонтной бригады к месту стоянки неисправной АТ:

$$\varepsilon_{\text{т}} = \frac{\overline{T}_{\text{т}}}{T_{\text{к}}} = \frac{0{,}5\overline{N}_{\text{тс}}}{N_{\text{АТ}}}. \tag{28}$$

Величины $\varepsilon_{\text{б}}$ и $\varepsilon_{\text{о}}$ при оценке системы ремонта определяются по формулам (17) и (18).

Из уравнения (17) с учетом (5) и (21) можем определить необходимое число ремонтных бригад, которые могут обеспечить восстановление появляющихся с интенсивностью $\lambda_{\text{эн}}$ эксплуатационных неисправностей техники в группе автотракторной техники, состоящей из $N_{\text{АТ}}$ автотракторной техники. Если известны или заданы руководством предприятия $K^{\text{г}}_{\text{тг}}$ (или $K_{\text{тг}}$) $\varepsilon_{\text{о}}$, $\varepsilon_{\text{б}}$ и $\mu_{\text{эн}}$, то число ремонтных бригад определяется по формуле:

$$n_{\text{рб}} = \frac{N_{\text{АТ}} \cdot \lambda_{\text{эн}} \cdot K^{\text{г}}_{\text{тг}}}{\mu_{\text{эн}} \cdot (1-\varepsilon_{\text{б}})} = \frac{N_{\text{АТ}} \cdot \lambda_{\text{эн}} \cdot K_{\text{тг}} \cdot (1-\varepsilon_0)}{\mu_{\text{эн}} \cdot (1-\varepsilon_{\text{б}})}. \tag{29}$$

Состав специалистов-ремонтников каждой ремонтной бригады определяется по формулам (1) и (2).

Формула (29) позволяет также определить необходимую суммарную производительность ремонтного органа предприятия для обслуживания $N_{\text{АТ}}$ и обеспечения заданного $K^{\text{г}}_{\text{тг}}$ при данной интенсивности эксплуатационных неисправностей $\lambda_{\text{эн}}$ и заданном коэффициенте простоя ремонтной бригады $\varepsilon_{\text{б}}$.

Так как $\mu_{\Sigma} = n_{\text{рб}} \cdot \mu_{\text{эн}}$, то

$$\mu_{\Sigma} = \frac{N_{\text{АТ}} \cdot \lambda_{\text{эн}} \cdot K^{\text{г}}_{\text{тг}}}{(1-\varepsilon_{\text{б}})} = \frac{N_{\text{АТ}} \cdot \lambda_{\text{эн}} \cdot K_{\text{тг}} \cdot (1-\varepsilon_0)}{(1-\varepsilon_{\text{б}})}. \tag{30}$$

Таким образом, выбранные критерии $K^{\text{г}}_{\text{тг}}$, $K_{\text{тг}}$ $\varepsilon_{\text{о}}$, $\varepsilon_{\text{с}}$, $\varepsilon_{\text{б}}$, $\varepsilon_{\text{т}}$ для оптимизации решения задачи позволяют найти оптимальное число ремонтных бригад предприятия – $n_{\text{рб opt}}$, которое обеспечивает заданный коэффициент готовности техники к выполнению задач по предназначению $K_{\text{г}}$ или $K^{\text{г}}_{\text{г}}$.

Задача по определению $n_{\text{рб opt}}$ также может быть решена методом проб путем задания ряда значений $n_{\text{рб}}$. В этом случае назначаются следующие исходные данные: $N_{\text{АТ}}$, $\lambda_{\text{эн}}$, $\mu_{\text{эн}}$, $n_{\text{рб}}$.

Задаваясь рядом значений $n_{\text{рб}}$, решаем систему уравнений (11) и определяем коэффициенты оптимизации: $\varepsilon_{\text{о}}$, $\varepsilon_{\text{б}}$, $\varepsilon_{\text{с}}$, $\varepsilon_{\text{т}}$, $K_{\text{тг}}$, $K^{\text{г}}_{\text{тг}}$.

Из рассчитанных вариантов по заданному руководством предприятия $K^{\text{г}}_{\text{тг}}$ находим наиболее оптимальный вариант и таким способом определяем $n_{\text{рб opt}}$ для заданных условий.

Коэффициент технической готовности группы АТ с учетом затрат времени на ее транспортировку в ремонт и из ремонта определяется формулой:

$$K^{\text{г}}_{\text{тг}t} = \frac{\varepsilon_{\text{т}}}{2\lambda_{\text{эн}} \cdot \overline{T}_{\text{т}} \cdot (1-\varepsilon_{\text{т}})} = \frac{1}{\lambda_{\text{эн}} \cdot (T_{\text{к}} - 2\overline{T}_{\text{т}})}. \tag{31}$$

Если ремонтная бригада выезжает к месту стоянки неисправной АТ, то величина $K^{\text{г}}_{\text{тг}t}$ определяется по формуле:

$$K^{\text{г}}_{\text{тг}t} = \frac{1}{\lambda_{\text{эн}} \cdot (T_{\text{к}} - \overline{T}_{\text{т}})}. \tag{32}$$

В восстановлении работоспособности одной группы АТ, как правило, будут принимать участие ремонтный состав ремонтного органа предприятия, который в каждом конкретном случае будет составлять одну ремонтную бригаду.

Оценка качества системы ремонта предприятия производится по следующим расчётным формулам, которые получаем из системы уравнений (11) при $n_{\text{рб}} = 1$:

а) вероятность того, что на ремонте в ремонтном органе предприятия находится N неисправной АТ, определяется по формуле:

$$P_N = \frac{N_{\text{АТ}}!\rho^N}{(N_{\text{АТ}} - N_{\text{пр}})!} \cdot P_{\text{о}}, \tag{33}$$

где $N_{\text{АТ}}$ – количество образцов в группе АТ на предприятии;

б) вероятность того, что в группе АТ, на предприятии вся техника исправна, определяется по формуле:

$$P_{\text{о}} = 1 - \frac{\lambda_{\text{эн}}}{\mu_{\text{эн}}} N_{\text{АТ}} \cdot K_{\text{тг}}^{\text{г}}. \tag{34}$$

в) коэффициент простоя АТ в очереди на ремонт:

$$\varepsilon_{\text{о}} = 1 - \frac{K_{\text{тг}}^{\text{г}}}{K_{\text{тг}}}. \tag{35}$$

г) коэффициент простоя ремонтной бригады без работы определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{б}} = 1 - \frac{\lambda_{\text{эн}}}{\mu_{\text{эн}}} N_{\text{АТ}} \cdot K_{\text{тг}}^{\text{г}}. \tag{36}$$

д) коэффициент простоя АТ в неисправном состоянии при транспортировке техники в ремонт и из ремонта:

$$\varepsilon_{\text{т}} = \frac{2\lambda_{\text{эн}} \cdot \overline{T}_{\text{т}}}{1 + 2\lambda_{\text{эн}} \cdot \overline{T}_{\text{т}} + \dfrac{N_{\text{пр}}}{N_{\text{АТ}} - N_{\text{пр}}}} = \frac{2\lambda_{\text{эн}} \cdot \overline{T}_{\text{т}} \cdot K_{\text{тг}}^{\text{г}}}{1 + 2\lambda_{\text{эн}} \cdot \overline{T}_{\text{т}} \cdot K_{\text{тг}}^{\text{г}}}. \tag{37}$$

Приведённые формулы позволяют решать на предприятии следующие задачи:

1) по заданным значениям величин $N_{\text{АТ}}$ $\lambda_{\text{эн}}$, $\overline{T}_{\text{т}}$, $K_{\text{тг}}$ и $K_{\text{тг}}^{\text{г}}$ определять $\varepsilon_{\text{о}}$, $\varepsilon_{\text{б}}$, $\varepsilon_{\text{т}}$, $\overline{T}_{\text{в}}$;

2) по значениям величин $N_{\text{АТ}}$, $\varepsilon_{\text{о}}$, $\varepsilon_{\text{б}}$, $K_{\text{тг}}$, $\lambda_{\text{эн}}$ определять необходимую производительность ремонтного органа $\mu_{\text{эн}}$, чтобы обеспечить заданный $K_{\text{тг}}^{\text{г}}$ – коэффициент технической готовности АТ предприятия и каждой АТ в отдельности $K_{\text{тг}}$.

Состав специалистов-ремонтников ремонтной бригады предприятия по специальностям определяется по формулам (1) и (2).

Заключение.

В статье представлены два метода расчета трудоемкости ремонтных работ при восстановлении автотракторной техники: статистический метод; метод с использованием теории массового обслуживания. Первый метод основывается на статистических нормах затрат времени на производство ремонтных работ. В этом методе не учитывалась динамика поступления автотракторной техники в ремонт и динамика функционирования системы ремонта. Поэтому полученные данные рекомендуются для проведения технических расчётов при оценке возможностей ремонтного органа по восстановлению неисправной автотракторной техники. Второй метод, дополняет первый и позволяет определить количество восстановленной автотракторной техники каждого типа за время, не превышающее располагаемое при различных трудоемкостях работы. Реализация данных методов позволит расширить возможности функционирования системы ремонта предприятия, по своевременному восстановлению автотракторной техники. Использование разработанных методов возможно раздельно, в зависимости от количества вышедшей из строя автотракторной техники, а также возможностей ремонтного органа по её восстановлению, но не позволит комплексно определить трудоёмкость ремонтных работ при восстановлении автотракторной техники на сельскохозяйственном предприятии.

Таким образом, изложенные в данной статье теоретические основы и практические рекомендации обеспечат руководству предприятий и их ремонтным органам возможности решать следующие задачи:

- по данным о вышедшей из строя АТ определять требующееся количество и состав ремонтных бригад, которые необходимо иметь на предприятии, чтобы за кратчайшее время восстановить неисправную технику;
- по данным о количестве имеющихся ремонтных бригад и их составу определять возможности ремонтного органа по восстановлению АТ за различные промежутки времени;
- по данным о количестве ремонтных бригад, их составу, имеющемуся выходу АТ из строя определять время, за которое она будет восстановлена;
- по данным о количестве подлежащей ремонту АТ и желаемой продолжительности выполнения работ определять требующееся количество и состав ремонтных бригад для её восстановления;
- определить оптимальные условия, когда рационально перевозить АТ в ремонтный орган, а когда целесообразно ремонтную бригаду к месту стоянки вышедшего из строя образца АТ;
- определять состав требующихся для выполнения ремонтных работ технических средств: запасных частей и принадлежностей, контрольно-измерительной аппаратуры, инструментов, оборудования, оснастки и материалов.

Список источников

1. Апробированное совершенствование сервиса автотракторных двигателей / А.Е. Ломовских [и др.] // Наука в Центральной России. 2020. № 6. С. 81–91.

2. Алябьев В.А., Бердов Е.И., Барышников С.А. Основы теории и методика определения параметров надежности сельскохозяйственных машин: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2018. 248 с.

3. Захаров Н.С., Елесин С.В. Технологические процессы технического обслуживания и ремонта транспортных машин. Диагностирование узлов и механизмов, обеспечивающих безопасность: учебное пособие. Тюмень: ТюмГНГУ, 2018. 118 с.

4. Кокорева Е.Б. Повышение эффективности использования сельскохозяйственной техники // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. № 2. С. 320–325.

5. Макаров В.Б. Техническое обслуживание и ремонт машин. М.: Агропромиздат, 2019. 521 с.

6. Никитченко С.Л., Воронов Е.В. Причинные факторы снижения эксплуатационной надежности сельскохозяйственной техники // Вестник НГИЭИ. 2020. №2 (105).

7. Соломкин А.П., Мяло О.В., Прокопов С.П. Влияние фактора старения на показатели надежности сельскохозяйственной техники // Достижения науки и техники АПК. 2015. №1.

8. Ломовских А.Е., Томилов А.А., Баглаев А.А. Способ повышения технической готовности машин // Специальные вопросы моделирования систем и процессов. 2021. С. 54–63.

References

1. A.E. Lomovskih et al. Approbated improvement of the service of autotractor engines // Science in Central Russia. 2020. No. 6. P. 81–91.

2. Aljab'ev V.A., Berdov E.I., Baryshnikov S.A. Fundamentals of the theory and methodology for determining the parameters of the reliability of agricultural machines: a textbook. Sankt-Peterburg: Lan', 2018. 248 p.

3. Zaharov N.S., Elesin S.V. Technological processes of maintenance and repair of transport vehicles. Diagnosis of nodes and mechanisms that ensure security: a tutorial. Tjumen': TjumGNGU, 2018. 118 p.

4. Kokoreva E.B. Improving the efficiency of using agricultural machinery. *Bjulleten' nauki i praktiki* = Bulletin of Science and Practice, 2018; 4(2):320–325.

5. Makarov V.B. Maintenance and repair of machines. M.: Agropromizdat, 2019. 521 p.

6. Nikitchenko S.L., Voronov E.V. Causal factors for reducing the operational reliability of agricultural machinery. *Vestnik NGIJeI*, 2020; 2(105).

7. Solomkin A.P., Mjalo O.V., Prokopov S.P. Influence of the aging factor on the reliability indicators of agricultural machinery. *Dostizhenija nauki i tehniki APK* = Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex, 2015; (1).

8. Lomovskih A.E., Tomilov A.A., Baglaev A.A. A way to increase the technical readiness of machines. *Special'nye voprosy modelirovanija sistem i processov*, 2021; 54–63.

Информация об авторах

А.А. Бородин – доктор технических наук; Ю.В. Родионов – доктор технических наук, профессор; А.Е. Ломовских - кандидат технических наук, доцент; В.С. Январев – адъюнкт кафедры; Е.А. Деревянко – адъюнкт кафедры; А.И. Скоморохова - аспирант.

Information about the authors

A. Borodin - Doctor of Technical Sciences; Yu. Rodionov - Doctor of Technical Sciences, Professor; A. Lomovskikh - candidate of technical sciences, associate professor; V. Yanvarev - adjunct of the department; E.A. Derevianko - adjunct of the department; A.I. Skomorokhova - graduate student..

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 11.03.2023 Принята к публикации (Accepted): 15.04.2023