

УДК 630.377

EDN: EGJNSD

ВЫБОР КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ТИПАЖА И ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ ПОГРУЗОЧНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРЕЛЕВОЧНОГО ПРОЦЕССА

Е.Е. Клубничкин

ORCID: 0000-0002-4086-1011 e-mail: klubnichkin@mgul.ac.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия**В.Е. Клубничкин**

ORCID: 0000-0002-1231-8185 e-mail: vklubnichkin@gmail.com

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Рассмотрены критерии оценки эффективности процесса трелевки при лесозаготовках. Цель состоит в выборе оптимального типа и грузоподъемности машин для обеспечения эффективного трелевочного процесса с минимальными экономическими затратами. Обоснована недостаточность показателя прибыли для оценки эффективности трелевки, предложено наряду с ним рассматривать конкретное время, затраченное на выполнение процесса трелевки, включая анализ времени, затраченного на перемещение, погрузку и разгрузку. Соотношение этих составляющих требуемого времени оказывает существенное влияние на производительность погрузочно-транспортных машин и стоимость трелевки. Обоснование критериев оценки исходит из аналитических зависимостей, полученных в результате сравнения различных вариантов трелевки с использованием различных типов и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин в идентичных условиях эксплуатации. Приведены формулы и выражения для расчета сокращения дистанции трелевки и затрат на сокращение времени в пути при замене погрузочно-транспортных машин различной грузоподъемности. Предлагается оценивать эффективность процесса трелевки на основе таких критериев, как пройденное расстояние, время в пути, время простоя при погрузке и разгрузке и общее время, необходимое для завершения процесса трелевки, что обеспечит всестороннюю оценку экономической эффективности процесса трелевки.

Ключевые слова: погрузочно-транспортная машина, скорость, время простоя, расстояние трелевки, использование грузоподъемности, почасовая производительность.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Клубничкин, Е.Е. Выбор критерия оценки влияния типажа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин на эффективность трелевочного процесса / Е.Е. Клубничкин, В.Е. Клубничкин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 82-96. EDN: EGJNSD

SELECTION OF CRITERION FOR ASSESSING IMPACT OF TYPE AND LOAD CAPACITY OF LOADING AND TRANSPORT VEHICLES ON EFFICIENCY OF SKIDDING

E.E. Klubnichkin

ORCID: 0000-0002-4086-1011 e-mail: klubnichkin@mgul.ac.ru

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia**V.E. Klubnichkin**

ORCID: 0000-0002-1231-8185 e-mail: vklubnichkin@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. The paper describes criteria for assessing the efficiency of the skidding process during logging are considered. The objective is to select the optimal type and load capacity of machines to ensure an efficient skidding process with minimal economic costs. The insufficiency of the profit indicator for assessing the efficiency of skidding is substantiated. It is proposed to use as an indicator the specific time spent on the skidding process, including an analysis of the time spent on transportation, loading and unloading. The ratio of these components of the required time has a significant impact on the productivity of loading and transport machines and the cost of skidding. The justification of the criteria for assessment is based on analytical dependencies obtained as a result of comparing different skidding options using different types and load capacities of loading and transport machines under identical operating conditions. Equations and expressions are given for calculating the reduction in skidding distance and the costs of reducing travel time when replacing loading and transport machines of different load capacities. It is proposed to evaluate the efficiency of the skidding process based on the following criteria: distance traveled, travel time, downtime during loading and unloading, and the total time required to complete the skidding process, which will provide a comprehensive assessment of the economic efficiency of the skidding process.

Key words: loading and transport machine, speed, downtime, skidding distance, load capacity utilization, hourly productivity.

FOR CITATION: Klubnichkin E.E., Klubnichkin V.E. Selection of criterion for assessing impact of type and load capacity of loading and transport vehicles on efficiency of skidding. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 82-96. EDN: EGJNSD

Введение

Оценка производительности лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин (ПТМ) предполагает учет показателей, выходящих за рамки чистой прибыли. Прибыль, несомненно, сохраняет решающее значение, но концентрация внимания исключительно на данном показателе может привести к игнорированию других важных факторов, влияющих на эффективность процесса трелевки. Мы рассмотрим важность использования для оценки производительности погрузочно-транспортных машин таких показателей, как объем трелевки в тоннах и уровень фактических затрат по сравнению с планом. Показана будет также важность учета времени, затраченного на трелевку, пройденного расстояния и других факторов при оценке выбора и использования ПТМ.

Объем трелевки и фактические затраты

Оценка объема трелевки в тоннах дает ценную информацию об эффективности ПТМ. Сравнивая запланированный объем с фактическим объемом трелевки, можно выявить любые расхождения и оперативно устранить потенциальные проблемы. Более того, мониторинг уровня фактических затрат по сравнению с планом помогает понять финансовые последствия процесса трелевки. Это позволяет провести всестороннюю оценку экономической эффективности погрузочно-транспортных машин, гарантируя, что эксплуатация остается устойчивой и рентабельной.

Фактор времени

Время играет решающую роль в определении эффективности процесса трелевки. Различные факторы, такие как время в пути и погрузочно-разгрузочные операции, влияют на общее время, затрачиваемое на трелевку. Принимая во внимание конкретное время, затраченное на трелевку, как в физическом, так и в денежном выражении, в качестве критерия оценки можно точно оценить эффективность ПТМ. Такой подход гарантирует, что при выборе и использовании погрузочно-транспортных машин приоритет отдается оптимизации времени, что приводит к повышению производительности и снижению эксплуатационных расходов.

Пройденное расстояние

В определенных сценариях, когда технические характеристики ПТМ различаются, оценка процесса трелевки на основе пройденного расстояния может быть полезным критерием. Понимание расстояния, пройденного различными ПТМ, работающими в одинаковых условиях, дает ценную информацию об их производительности. Учитывая этот критерий, заинтересованные стороны могут принимать обоснованные решения относительно выбора и использования погрузочно-транспортных машин, повышая общую эффективность и сокращая ненужные расходы [1-7]. Чтобы обосновать критерии оценки процесса трелевки, необходимо проанализировать различные варианты сортировки трелевочных материалов с использованием разных типов и грузоподъемности погрузочных и транспортных средств. Этот анализ подчеркивает важность учета таких факторов, как пройденное расстояние, время в пути, время простоя при погрузке/разгрузке и общее время, необходимое для завершения процесса трелевки. Тщательно оценив эти факторы, заинтересованные стороны могут принимать обоснованные решения относительно наиболее эффективного выбора ПТМ для процесса трелевки.

Прибыль, оставаясь решающим фактором при оценке выбора погрузочно-транспортных средств для процесса трелевки, тем не менее, не должна быть единственным критерием. Принимая во внимание такие показатели, как объем трелевки в тоннах, уровень фактических затрат по сравнению с планом, время, затраченное на трелевку, и пройденное расстояние, заинтересованные стороны могут принимать обоснованные решения для максимизации эффективности и снижения эксплуатационных расходов. Комплексная оценка характеристик погрузочно-транспортных машин обеспечивает эффективный выбор и использование погрузочно-транспортных машин, что приводит к устойчивым и оптимизированным процессам трелевки в лесозаготовительной промышленности.

Критерии должны давать сравнительную оценку каждого из вариантов выбора типа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин для конкретно заданных условий трелевки сортиментов. В условиях наличия большого количества объектов трелевки сортиментов и разнотипности погрузочно-транспортных машин возможны различные варианты выбора использования и расстановки имеющегося парка ПТМ, а поэтому эффективность трелевочного процесса, в том или ином случае, будет также различной. Поэтому задачу поиска оптимального варианта типажа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин сведем к выбору и оптимальной расстановке имеющейся в наличии ПТМ по объектам трелевки, которая обеспечивала бы выполнение заданного объема трелевки сортиментов с минимальными хозяйственными издержками. С этой целью проанализируем возможные критерии указанной оценки производительности ПТМ.

Анализ возможных критериев оценки эффективности трелевочного процесса

Наиболее приемлемым показателем оценки деятельности первичного лесного транспорта является объем трелевки в тоннах и уровень фактических расходов, сопоставляемых с планом, скорректированным на фактический объем трелевки [6, 7]. Этот показатель исходит из самой сущности трелевочного процесса, так как продукцией транспорта является процесс перемещения.

Прибыль, в данном случае, хотя и является плановым показателем финансово-хозяйственной деятельности лесозаготовительных предприятий, является выразителем лишь небольшой части этих затрат, которая, кстати, зависит не только от результатов использования ПТМ, но также и от норматива и уровня тарифной платы, установленной за трелевку груза, поскольку прибыль есть разница между доходами и фактическими расходами лесозаготовительного предприятия. Принять в таком случае прибыль в качестве критерия оценки выбора погрузочно-транспортных машин было бы неправильно, так как этот показатель ори-

ентировал бы нас не столько на эффективный выбор типажа погрузочно-транспортных машин применительно к условиям трелевки, сколько на выбор наиболее прибыльных высоко тарифицируемых операций трелевки. Кроме того, лесозаготовительному предприятию задаются планом строго конкретные трелевки сортиментов и этим уже определяются плановые доходы, расходы и прибыль. Сверхплановая же прибыль, при строгом соблюдении плановых объемов трелевки сортиментов, может быть достигнута лишь за счет уменьшения планируемых на это расходов, т.е. за счет снижения себестоимости трелевки сортиментов.

Если к изложенному прибавить то, что средний размер прибылей в лесозаготовительных предприятиях обычно составляет около 15-20 %, а затраты – 80-85 % от плановых доходов, то становится очевидным, что в качестве наиболее объективных показателей работы первичного лесного транспорта могут быть приняты: количество перевезенных тонн груза и фактические затраты на выполнение трелевочного процесса. Вместе с этим, количество перевезенных тонн и фактические затраты на выполнение трелевочного процесса обуславливаются, в каждом отдельном случае, условиями трелевки сортиментов. Поскольку, в конечном итоге, вся экономия сводится к экономии времени, в качестве критерия эффективности трелевочного процесса необходимо принять удельные затраты времени на выполнение трелевочного процесса в натуральном и ценностном выражении.

В процессе трелевки сортиментов необходимое время складывается из затрат времени расходуемых на движение и погрузочно-разгрузочные операции [8-11]. В каждом отдельном случае соотношение удельных весов этих составных частей необходимого времени оказывает существенное влияние на производительность погрузочно-транспортных машин и себестоимость трелевки сортиментов, а, следовательно, и на эффективность трелевочного процесса в целом. Более того, определение затрат необходимого времени в натуральном или ценностном выражении представляет качественно разные аспекты хозяйственной эффективности трелевочного процесса. Во всех иных случаях, когда основным условием трелевочного процесса является минимум транспортных издержек, в качестве критериев эффективности трелевочного процесса следует принимать необходимое время на его выполнение в ценностном выражении.

В тех же случаях, когда по условиям трелевки сортиментов техническая скорость различных ПТМ будет одинаковой или относительно близкой, затраты необходимого на движение времени будут пропорциональны пройденному пути и тогда в качестве критерия оценки трелевочного процесса может условно быть принят пройденный путь. Так, в частности производится оценка транспортного процесса при организации трелевки сортиментов по проложенным трелевочным волокам.

Таким образом, на основании изложенного можно заключить, что в качестве возможных критериев оценки эффективности трелевочного процесса целесообразно принять: пройденный путь ПТМ, время движения, время простоя под погрузкой-разгрузкой и суммарное время на выполнение трелевочного процесса в натуральном и ценностном выражении.

Обоснование критериев оценки

Для обоснования принятых критериев оценки транспортного процесса воспользуемся аналитическими зависимостями, полученными при сравнении вариантов трелевки сортиментов погрузочно-транспортными машинами различного типажа и грузоподъемности в идентичных условиях их эксплуатации. Обоснование того или иного критерия оценки будет вытекать из анализа результатов исследования. Рассмотрим каждый из возможных критериев оценки отдельно.

Пройденный путь

Пройденный путь первичного лесного транспорта ($L_{об}$) в условиях заданного объема трелевки (Q), среднего расстояния трелевки ($l_{гр}$), грузоподъемности ПТМ (q_H), коэффициен-

та использования расстояния трелевки (β), и коэффициента использования грузоподъемности (γ) принято определять по следующей зависимости:

$$L_{об} = \frac{Q_{гр}}{\beta q_{н1} \gamma} \quad (1)$$

Здесь и дальше рассматриваемый нами трелевочный процесс исключает случаи сортировки сортиментов.

Если же при соблюдении указанных условий при трелевке сортиментов заменить погрузочно-транспортные машины одной грузоподъемности ($q_{н1}$) на другую ($q_{н2}$) и допустить, что в этом случае [12-14], то разность в пройденном пути (Δl), полученная за счет указанного, определится из выражения:

$$\Delta l = \frac{Q_{гр}}{\beta q_{н1} \gamma_1} - \frac{Q_{гр}}{\beta q_{н2} \gamma_2} = \frac{Q_{гр}}{\beta \gamma} \left(\frac{1}{q_{н1}} - \frac{1}{q_{н2}} \right) = \frac{Q_{гр}}{\beta \gamma} \cdot \frac{1 - \frac{q_{н1}}{q_{н2}}}{q_{н1}} \quad (2)$$

Заменив $Q_{гр} \cdot P$ (суммарный грузооборот) получим:

$$\Delta l = \frac{P}{\beta \gamma} \cdot \frac{1 - \frac{q_{н1}}{q_{н2}}}{q_{н1}}, \quad (3)$$

следовательно:

$$\frac{1 - \frac{q_{н1}}{q_{н2}}}{q_{н1}} = K_1 \quad (4)$$

и назовем его коэффициентом предпочтения по пройденному пути, а выражение (2) представим в общем виде следующим образом:

$$\Delta l = \frac{PK_1}{\beta \gamma} \quad (5)$$

Как следует из представленной зависимости (5), сокращение расстояния трелевки, полученное в результате замены ПТМ меньшей грузоподъемности на большую, прямо пропорционально грузообороту и коэффициенту предпочтения и обратно пропорционально произведению коэффициентов использования расстояния трелевки и номинальной грузоподъемности. В случае замены ПТМ большей грузоподъемности на меньшую коэффициент предпочтения будет величиной положительной и общий пройденный путь при этом увеличится, что подтвердит нерациональность такой замены.

Стоимость сокращения расстояния трелевки (ΔS_e) с выражением (2 и 3) определяем следующим образом:

$$\Delta S_e = \frac{S_1 Q_{гр}}{\beta q_{н1} \gamma} - \frac{S_2 Q_{гр}}{\beta q_{н2} \gamma} = \frac{P}{\beta \gamma} \left(\frac{S_1 q_{н1} - S_2 q_{н1}}{q_{н1} q_{н2}} \right) = \frac{P}{\beta \gamma} \left(\frac{S_1 - S_2 \frac{q_{н1}}{q_{н2}}}{q_{н1}} \right)^0 \quad (6)$$

Обозначив

$$\frac{S_1 - S_2 \frac{q_{н1}}{q_{н2}}}{q_{н1}} = K'_1 \quad (7)$$

(коэффициент предпочтения по стоимости пройденного пути), получим окончательное выражение для ΔS_e ;

$$\Delta S_e = \frac{PK'_1}{\beta \gamma}, \quad (8)$$

где:

ΔS_e – стоимость сокращения расстояния трелевки в руб.;

S_1 – стоимость затрат на метр пути для определенного типа погрузочно-транспортных машин грузоподъемностью $q_{н1}$, в руб. за м.;

S_2 – тоже, грузоподъемностью $q_{н2}$.

Время движения

Время движения погрузочно-транспортных машин $T_{\text{ПТМ}}$ определим из выражения:

$$T_{\text{ПТМ}} = \frac{L_{\text{об}}}{V_t} \quad (9)$$

Разность времени движения ($\Delta T_{\text{ПТМ}}$), полученное в результате замены ПТМ грузо-подъемности q_{H1} , на q_{H2} определяем следующим образом:

$$\Delta T_{\text{ПТМ}} = \frac{L_{\text{об}1}}{V_{t1}} - \frac{L_{\text{об}2}}{V_{t2}} = \frac{Q_{\text{гр}}}{\beta \gamma q_{H1} V_{t1}} - \frac{Q_{\text{гр}}}{\beta \gamma q_{H2} V_{t2}} = \frac{P}{\beta \gamma} \left(\frac{1 - \frac{q_{H1} V_{t1}}{q_{H2} V_{t2}}}{q_{H1} V_{t1}} \right) \quad (10)$$

Обозначив

$$\frac{1 - \frac{q_{H1} V_{t1}}{q_{H2} V_{t2}}}{q_{H1} V_{t1}} = K_2 \quad (11)$$

(коэффициент предпочтения по времени движения), получим окончательное выражение для $\Delta T_{\text{ПТМ}}$:

$$\Delta T_{\text{ПТМ}} = \frac{PK_2}{\beta \gamma} \quad (12)$$

Стоимость сокращенного времени движения, полученного от замены погрузочно-транспортных машин q_{H1} на q_{H2} определяем из следующей зависимости:

$$\Delta S_{\text{ПТМ}} = \frac{P}{\beta \gamma} \left(\frac{C_1}{q_{H1} V_{t1}} - \frac{C_2}{q_{H2} V_{t2}} \right) \quad (13)$$

C_1 и C_2 стоимости одного часа движения погрузочно-транспортных машин определенного типа и соответственно грузо-подъемности q_{H1} и q_{H2} в руб. за час., но так как $C_1 = S_1 V_1$, а $C_2 = S_2 V_2$ то подставив указанные значения в зависимость (13), получим:

$$\Delta S_{q\rho} = \frac{P}{\beta \gamma} \left(\frac{S_1 V_{t1}}{q_{H1} V_{t1}} - \frac{S_2 V_{t2}}{q_{H2} V_{t2}} \right) = \frac{P}{\beta \gamma} \cdot \left(\frac{S_1 - S_2 \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} \right) \quad (14)$$

Заменив

$$\frac{S_1 - S_2 \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} = K'_2 \quad (15)$$

(коэффициент предпочтения по стоимости времени движения), получим окончательное выражение для $\Delta S_{q\rho}$:

$$\Delta S_{q\rho} = \frac{PK'_2}{\beta \gamma} \quad (16)$$

Сравнив зависимость (16) с (7), убеждаемся, что $K'_1 = K'_2$, то есть коэффициенты предпочтения по стоимости расстояния трелевки и времени расстояния трелевки есть суть одно и то же.

Время простоя погрузочно-транспортных машин под погрузкой-разгрузкой

Время простоя ПТМ под погрузкой-разгрузкой определяем из выражения:

$$T_{\text{пр}} = \frac{Q}{q_{H\gamma}} \cdot t_{\text{пр}} \quad (17)$$

где $t_{\text{пр}}$ – время простоя в час. на трелевку;

При замене ПТМ q_{H1} на q_{H2} разность времени простоя под погрузкой-разгрузкой будет составлять:

$$\Delta T_{\text{пр}} = \frac{Q}{q_{H1}\gamma} t_{\text{пр}1} - \frac{Q}{q_{H2}\gamma} t_{\text{пр}2} = \frac{Q}{\gamma} \left(\frac{t_{\text{пр}1}}{q_{H1}} - \frac{t_{\text{пр}2}}{q_{H2}} \right) = \frac{Q}{\gamma} \left(\frac{t_{\text{пр}1} - t_{\text{пр}2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} \right) \quad (18)$$

Для идентичности с ранее указанными зависимостями (ΔL , $\Delta T_{\text{ПТМ}}$) выразим $\Delta T_{\text{пр}}$ не через объем трелевки (Q), а через грузооборот P , тогда:

$$\Delta T_{\text{пр}} = \frac{Q l_{\text{гр}}}{\beta \gamma} \left(\frac{t_{\text{пр}1} - t_{\text{пр}2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} \right) \cdot \frac{\beta}{l_{\text{гр}}} \quad (19)$$

Обозначив
$$\frac{t_{np1} - t_{np2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}} \beta}{q_H l_{rp}} = K_3 \quad (20)$$

(коэффициент предпочтения по времени простоя), получаем окончательное выражение для ΔT_{np} :

$$\Delta T_{np} = \frac{PK_3}{\beta\gamma} \quad (21)$$

По аналогии с выражением (14) запишем значение стоимости дополнительного времени простоя ΔS_{np} при замене ПТМ q_{H1} на q_{H2} :

$$\Delta S_{np} = \frac{P}{\beta\gamma} \left(\frac{S'_1 t_{np1} - S'_2 t_{np2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} \right) \cdot \frac{\beta}{l_{rp}} \quad (22)$$

где: S'_1 S'_2 – стоимость 1 часа простоя ПТМ под погрузкой-разгрузкой в руб. соответственно для q_{H1} и q_{H2}

Заменив выражение:

$$\frac{S'_1 t_{np1} - S'_2 t_{np2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} \cdot \frac{\beta}{l_{rp}} = K'_3 \quad (23)$$

(коэффициент предпочтения по стоимости времени простоя), получаем окончательное выражение для ΔS_{np} :

$$\Delta S_{np} = \frac{PK'_3}{\beta\gamma} \quad (24)$$

Суммарное время трелевки сортиментов (T_{Π}) определяем следующим образом:

$$T_{\Pi} = T_{ПТМ} + T_{np} \quad (25)$$

Разность времени трелевки сортиментов, полученная от замены ПТМ грузоподъемности q_{H1} на q_{H2} будет составлять:

$$\Delta T_{\Pi} = \Delta T_{ПТМ} + \Delta T_{np} = \frac{PK_2}{\beta\gamma} + \frac{PK_3}{\beta\gamma} = \frac{P}{\beta\gamma} (K_2 + K_3) = \frac{P}{\beta\gamma} \left(\frac{1 - \frac{q_{H1} V t_1}{q_{H2} V t_2}}{q_{H1}} + \frac{t_{np1} - t_{np2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} \cdot \frac{\beta}{l_{rp}} \right) \quad (26)$$

Стоимость разности суммарного времени трелевки сортиментов (ΔS_{Π}), (коэффициент предпочтения по времени трелевки), получаем окончательное выражение для ΔT_{Π} :

$$\Delta T_{\Pi} = \frac{PK_4}{\beta\gamma} \quad (27)$$

Стоимость разности суммарного времени трелевки сортиментов (ΔS_{Π}), полученной от замены ПТМ грузоподъемностью q_{H1} на q_{H2} , по аналогии с зависимостью (27) выразим следующим образом:

$$\Delta S_{\Pi} = \frac{P}{\beta\gamma} (f'_2 + f'_3) = \frac{P}{\beta\gamma} \left(\frac{S_1 + S_2 \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} + \frac{S'_1 t_{np1} - S'_2 t_{np2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} \cdot \frac{\beta}{l_{rp}} \right) \quad (28)$$

Обозначив

$$\frac{S_1 + S_2 \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} + \frac{S'_1 t_{np1} - S'_2 t_{np2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} \cdot \frac{\beta}{l_{rp}} = K'_4 \quad (29)$$

(коэффициент предпочтения по стоимости времени трелевки), получаем окончательное выражение для ΔS_{Π} :

$$\Delta S_{\Pi} = \frac{PK'_4}{\beta\gamma} \quad (30)$$

Следовательно, замена типажа ПТМ грузоподъемностью q_{H1} на q_{H2} , в равных эксплуатационных условиях вызывает разность в пройденном пути, времени движения, времени простоя под погрузкой-разгрузкой и суммарном времени трелевки, которая прямо пропорциональна выражению $\frac{P}{\beta\gamma}$ умноженному на соответствующий коэффициент предпочтения. Расчетные формулы коэффициентов предпочтения и их аналитические выражения представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Расчетные формулы коэффициентов предпочтения
и их аналитические выражения

Table 1.
Calculation equations of preference factors and their analytical expressions

№	Наименование	Размерность	Символ	Расчетная формула
1.	Коэффициент предпочтения по пробегу	1/тонн	K_1	$= \frac{1 - \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}}$
		Руб/т. метры	K'_1	$= \frac{S_1 - S_2 \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}}$
2.	Коэффициент предпочтения по времени движения	час/т. метр	K_2	$= \frac{1 - \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}}$
		Руб/т. метры	K'_2	$= \frac{S_1 - S_2 \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}}$
3.	Коэффициент предпочтения по времени простоя под погрузкой-выгрузкой	час/т. метр	K_3	$= \frac{t_{np1} - t_{np2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}} \cdot \frac{\beta}{l_{гр}}}{q_{H1}}$
		Руб/т. Метры	K'_3	$= \frac{S'_1 t_{np1} - S'_2 t_{np2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}} \cdot \frac{\beta}{l_{гр}}}{q_{H1}}$
4	Коэффициент предпочтения по времени трелевок	час/т. метр	K_4	$= \frac{1 - \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} + \frac{t_{np1} - t_{np2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}} \cdot \frac{\beta}{l_{гр}}}{q_{H1}}$
		Руб/т. метры	K'_4	$= \frac{S_1 - S_2 \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} + \frac{S'_1 t_{np1} - S'_2 t_{np2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}} \cdot \frac{\beta}{l_{гр}}}{q_{H1}}$

Коэффициенты предпочтения, как выводы представленных формул, имеют размерность час/т. метры и руб/т. метры, исключая коэффициент предпочтения по пройденному пути, размерность которого 1/Т. Такая идентичность размерности коэффициентов подтверждает то, что они характеризуют одни и те же явления и закономерности, а разница в их абсолютных значениях определяет степень точности характеристики этих явлений и закономерностей. Поэтому определим предельные значения коэффициентов предпочтения для различного типажа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин в типичных условиях эксплуатации и установим степень отклонения их абсолютных значений. Если она окажется несущественной, то для оценки выбора типажа и грузоподъемности ПТМ примем тот из них, который окажется наиболее простой по технике вычисления и будет обеспечивать получение точного результата. Когда же отклонения абсолютных значений коэффициентов предпочтения будут велики, то для оценки выбора погрузочно-транспортных машин примем тот из них, который наиболее полно и всесторонне будет характеризовать все особенности транспортного процесса.

Расчеты предельных значений коэффициентов предпочтения выполнены исходя из ранее установленных нами показателей V_t и t_{np} , а также расчетных данных S и S' для условий:

- а) когда $q_{H1} = 0,8$ т., а $q_{H2} = 20$ т. и K_{min} когда $q_{H1} = 13$ т., а $q_{H2} = 20$ т.;
- б) по погрузочно-транспортная машина третьего типа: K_{max} , когда $q_{H1} = 2,25$ т., $q_{H2} = 27$ т. и K_{min} когда $q_{H1} = 25$ т., а $q_{H2} = 27$ т.;

в) для K_3 , K'_3 , K_4 и K'_4 принято случай, когда $\frac{\beta}{l_{гр}} = 1$, то есть максимально возможное значение (поскольку с увеличением $l_{гр}$ более 1 отношение $\frac{\beta}{l_{гр}}$ будет уменьшаться, уменьшая этим K).

Результаты расчетов коэффициентов предпочтения погрузочно-транспортных машин различного типажа и грузоподъемности представлены на графиках (рис. 1, 2), а предельные значения в табл. 1.

Анализ представленных на рис. 1 и 2 функциональных зависимостей и предельных значений коэффициентов предпочтения погрузочно-транспортных машин [15-17] в наиболее типичных условиях их эксплуатации убеждает в нижеследующем:

а) с увеличением разности грузоподъемности погрузочно-транспортных машин ($q_{Н1} - q_{Н1}$) во всех расчетных формулах коэффициентов предпочтения по времени движения, простоя и трелевки сортиментов правая часть числителя будет уменьшаться, увеличивая этим значение числителя, а так как общий знаменатель при этом остается неизменным, то частное от деления всегда будет положительным и тем больше, чем больше разность грузоподъемностей ($q_{Н1} - q_{Н1}$);

б) с увеличением разности грузоподъемности погрузочно-транспортных машин ($q_{Н1} - q_{Н1}$) в случае определения коэффициентов предпочтения в стоимостном выражении, стоимость времени движения (K'_2) всегда будет увеличиваться, а стоимость времени простоя (K'_3) уменьшаться, поэтому суммарная стоимость трелевки сортиментов (K'_4) может иметь как положительное, так и отрицательное значение, в зависимости от того, какое слагаемое по абсолютной величине окажется большим (K'_2 или K'_3);

в) коэффициенты предпочтения погрузочно-транспортных машин по времени трелевки (K_4) и его стоимости (K'_4) включают в себя как время движения, так и время простоя, они наиболее полно характеризуют эти оба элемента транспортного процесса, а поэтому являются обобщающими коэффициентами предпочтения погрузочно-транспортных машин.

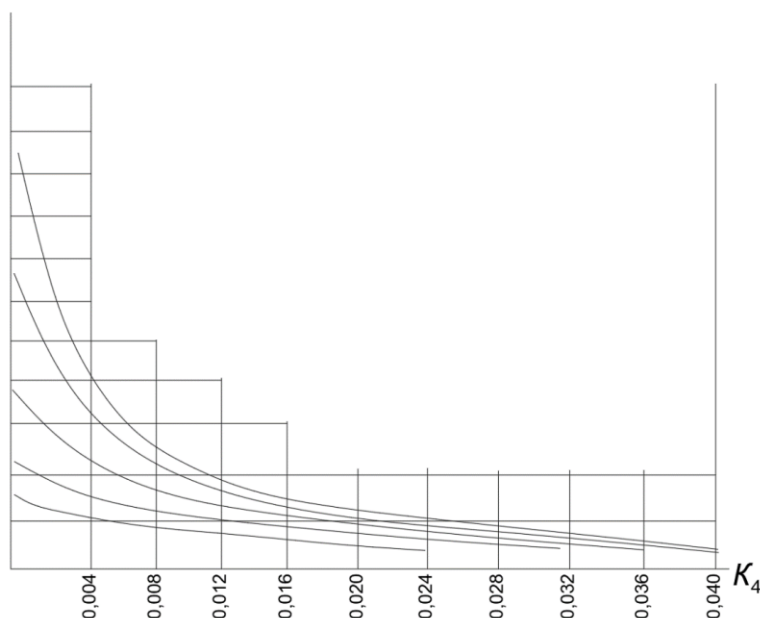


Рис. 1. Коэффициент предпочтения погрузочно-транспортных машин по времени трелевки (K_4), в час/т. метры

Fig. 1. Preference factors of loading and transport vehicles in terms of skidding time (K_4), h/t·m

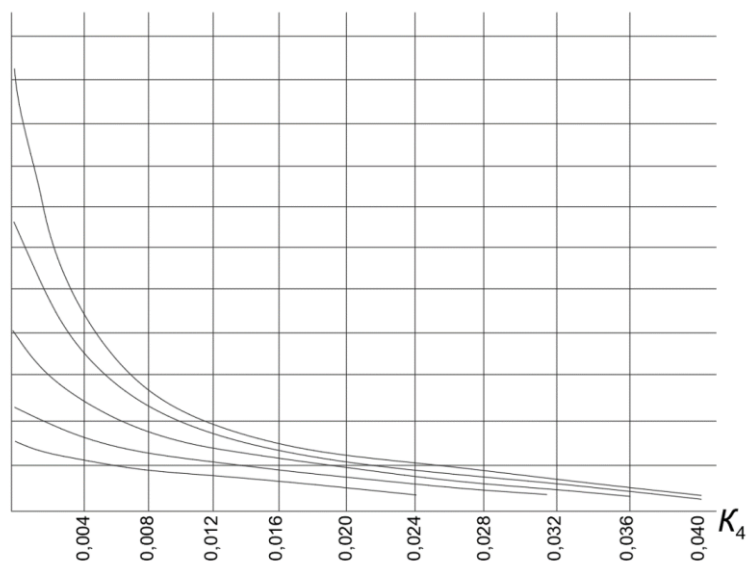


Рис. 2. Коэффициент предпочтения погрузочно-транспортных машин по времени трелевки (K_4'), в руб./т.м

Fig. 2. Preference factors of loading and transport vehicles in terms of skidding time (K_4'), in RUB/t.m

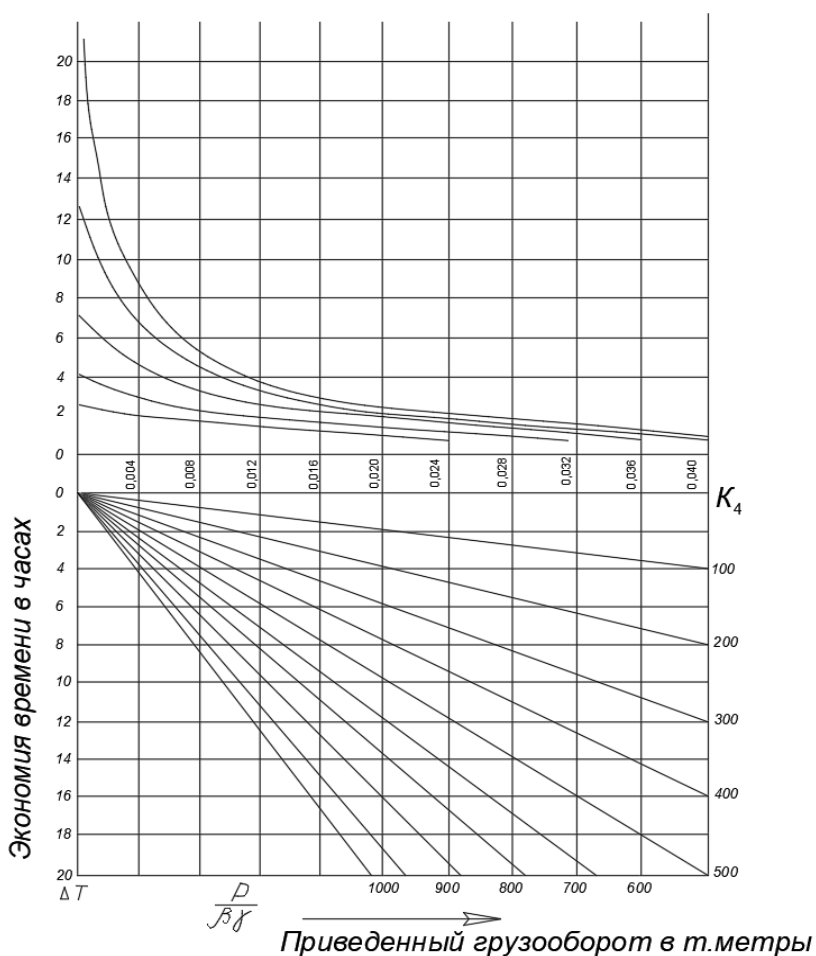


Рис. 3. Номограмма выбора погрузочно-транспортных машин по себестоимости трелевки третьего типа $l_{гр}=500$ м, $\beta = 0,5$

Fig. 3. Nomogram for selection of loading and transport machines based on the cost price of skidding of the third type $l_{gr}=500$ m, $\beta = 0,5$

Математическая формулировка задачи оптимальной расстановки погрузочно-транспортных машин

Приняв в качестве обобщающих критериев оценки трелевочного процесса стоимость и время трелевки сортиментов, сформулируем постановку задачи следующим образом. Имеется m -типов погрузочно-транспортных машин в количествах $a_1, a_2, a_3, \dots, a_m$, единиц и n маршрутов, по которым необходимо выполнять трелевку $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ единиц груза сортиментов. При этом, любой тип погрузочно-транспортных машин возможно использовать на любом маршруте трелевочного волокна. Пусть производительность i -ого типа погрузочно-транспортных машин на J -ом маршруте за время смены обозначается – P_{ij} ; количество погрузочно-транспортных машин i -ого типа, работающих на J -ом маршруте – X_{ij} а стоимость трелевки одной тонны груза сортиментов i -ом типом погрузочно-транспортных машин на J -ом маршруте трелевочного волокна – C_{ij} . Требуется найти такой план трелевки сортиментов $[[X_{ij}]]$ который не превышал бы наличного количества погрузочно-транспортных машин, обеспечивал бы полную трелевку сортиментов по каждому маршруту трелевочного волокна и обращал бы в минимум стоимость трелевки, то есть:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq a_i \tag{31}$$

$$\sum_{i=1}^m P_{ij} X_{ij} = Q_j \tag{32}$$

где $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n; X_{ij} \geq 0$.

Перемещенные X_{ij} должны минимизировать линейную форму

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} P_{ij} X_{ij} = Q_j \tag{33}$$

Условия (31, 32, 33), можно записать в виде матричных таблиц (табл. 2), на основе которой представлена развернутая формулировка задачи где требуется:

найти значение X_{ij} удовлетворяющие ограничивающим условиям:

а) по количеству погрузочно-транспортных машин

$$\left. \begin{aligned} X_{11} + X_{12} + \dots + X_{1n} &\leq a_1 \\ X_{21} + X_{22} + \dots + X_{2n} &\leq a_2 \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \\ X_{m1} + X_{m2} + \dots + X_{mn} &\leq a_m \end{aligned} \right\} \tag{34}$$

Таблица 2.
Матричная таблица

Table 2.
Matrix table

объем трелевок в т.	Q1,	Q2,	Q3	...	Qn-2	Qn-1	Qn
Количество ПТМ в шт.				...			
a1	C11	C12	C13	...	C1n-2	C1n-1	C1n
	P11	P12	P13		P1n-2	P1n-1	P1n
a2	C21	C22	C23	...	C2n-2	C2n-1	C2n
	P21	P22	P23		P2n-2	P2n-1	P2n
a3	C31	C32	C33	...	C3n-2	C3n-1	C3n

Окончание табл. 2.
Матричная таблица

Table 2. continued
Matrix table

	P31	P32	P33		P3n-2	P3n-1	P3n
.....
				...			
am-1	Cm-11	Cm-12	Cm-13		Cm-1n-2	Cm-1n-1	Cm-1n
	Pm-11	Pm-12	Pm-13	...	Pm-1n-2	Pm-1n-1	Pm-1n
am	Cm1	Cm2	Cm3		Cmn-2	Cmn-1	Cmn
	Pm1	Pm2	Pm3	...	Pmn-2	Pmn-1	Pmn

а) по объему выполняемой работы

$$\left. \begin{aligned} P_{11}X_{11} + P_{21}X_{21} + \dots + P_{m1}X_{m1} &= Q_1 \\ P_{12}X_{12} + P_{22}X_{22} + \dots + P_{m2}X_{m2} &= Q_2 \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ P_{1n}X_{1n} + P_{2n}X_{2n} + \dots + P_{mn}X_{mn} &= Q_n \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Целевая функция задачи выражается линейной формой вида:

$$F = C_{11}P_{11}X_{11} + C_{12}P_{12}X_{12} + \dots + C_{1n}P_{1n}X_{1n} + C_{2n}P_{2n}X_{2n} + C_{mn}P_{mn}X_{mn} \quad (36)$$

В случае, когда расстановка погрузочно-транспортных машин будет производиться не по стоимости трелевки сортиментов, а по минимуму провозных возможностей (максимум производительности или минимум необходимого времени), то постановка задачи будет формулироваться следующим образом.

При тех же условиях трелевки требуется найти такой план расстановки погрузочно-транспортных машин $[[X_{ij}]]$, который не превышал бы его наличного количества, обеспечивал бы полностью трелевку сортиментов по каждому маршруту и обращал бы в минимум провозные возможности, то есть при ограничениях (31 и 32) переменные X_{ij} должны минимизировать линейную форму:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} \rightarrow \min \quad (37)$$

В развернутом виде эта задача будет иметь ограничивающие условия (34 и 35), а целевая функция представлена формой:

$$F' = X_{11} + X_{12} + \dots + X_{1n} + X_{mn} \quad (38)$$

Из поставленных задач видно, что они относятся к классу задач линейного программирования и представляют собой обобщающую транспортную задачу со взаимозаменяемостью, известной в технической литературе как k -я и λ -а задача [3, 4]. Их решение может выполняться методом разрешающих множителей, предложенным Л.Б. Канторовичем, методом градиентного спуска в пространстве потенциалов с применением сглаживающей функции, предложенным Н.З. Шором [18, 19], более точным, но сложным методом В.В. Шкарубы [20-22] и симплекс-методом.

Нами применен и практически опробован для решения поставленных задач модифицированный симплекс-метод с верхними пределами с использованием прикладной компьютерной программы, разработанной фирмой *Siminthech*. Программа состоит из 980 команд и констант и решает задачу линейного программирования типа

$$\sum_{j=1}^n C_j X_j \left| \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \leq P_i \quad (i = 1, 2 \dots m-\tau) \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq P_i \quad (i = m-\tau + 1, \dots m) \end{array} \right| \quad (39)$$

$$0 \leq X_j \leq \widehat{X}_j$$

где: τ – количество условий типа $=$ и \geq ;

K – количество условий типа \geq ;

\widehat{X}_j – верхние границы переменных;

n – количество переменных;

m – количество ограничений.

Ограничения, которые накладываются на исходные данные, составляют:

$$n + K \leq 500$$

$$m \leq 158$$

$$(m+K)m \leq 4096$$

Этот способ решения более прост, удобен и позволяет получить хорошие результаты при минимальных затратах машинного времени, о чем свидетельствует экспериментальная проверка.

Выводы

На основании изложенного можно сделать следующие обобщающие выводы:

- 1) увеличение грузоподъемности ПТМ всегда уменьшает удельные затраты времени на единицу транспортной работы, поэтому, для сокращения времени трелевки сортиментов всегда целесообразно использовать ПТМ большей грузоподъемности на объектах с большим грузооборотом;
- 2) увеличение грузоподъемности ПТМ различного типажа не во всех случаях снижает удельные затраты на трелевку сортиментов, поэтому и степень влияния ПТМ на удельные затраты различна, в зависимости от конкретных условий их эксплуатации;
- 3) в качестве обобщающих критериев оценки влияния ПТМ на эффективность трелевочного процесса необходимо принять: время трелевки сортиментов – для всех тех случаев, когда решающим фактором является скорость трелевки сортиментов, и стоимость трелевки сортиментов во всех остальных случаях, когда решающим фактором транспортного процесса являются издержки на трелевку сортиментов;
- 4) для практического решения вопросов рационального выбора ПТМ по коэффициенту предпочтения целесообразно строить по указанным зависимостям номограммы (рис. 3) и по ним, зная условия трелевки, заданный грузооборот, устанавливать наиболее экономичный, по производительности и по стоимости трелевки, тип погрузочно-транспортных машин;
- 5) с этой целью авторами была разработана и опробована программа расчета коэффициента предпочтения для марок любых производителей ПТМ в заданных условиях трелевки в прикладном пакете программ *Simintech* [23, 24];
- 6) использование номограммами коэффициентов предпочтения для рационального выбора погрузочно-транспортных машин практически и оправдано лишь на стадии проектирования трелевочного процесса на длительный промежуток времени (при перспективном планировании) или в случае разового решения этого вопроса. Поэтому общую задачу выбора ПТМ следует рассмотреть в более сложной ее постановке, когда требуется рационально выбрать и расставить наличный ПТМ различного типажа в заданных условиях трелевки сортиментов.

Библиографический список

1. **Kotiev, G.O.** A method to improve forwarders' energy performance and environmental compatibility / G.O. Kotiev, E.E. Klubnichkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Nizhny Novgorod State Technical University. 2021. Том 1086. С. 012004.
2. **Клубничкин, Е.Е.** Выбор и обоснование конструкции грузового отсека погрузочно-транспортной машины / Е.Е. Клубничкин, Г.О. Котиев, М.В. Федотов, И.О. Наказной, Д.И. Рогачев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 163. С. 74-90.
3. **Агейкин, Я.С.** Проприетарность автомобилей / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 230 с.
4. **Макаров, В.С.** Исследование деформационных свойств дорожно-грунтовых оснований типа микст / В.С. Макаров, А.М. Беляев, А.И. Марковнина, В.В. Беляков // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021. Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. С. 430-434.
5. **Клубничкин, В.Е.** Краткий анализ тенденций развития лесозаготовительных машин / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, А.Б. Карташов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 3 (130). С. 93-102.
6. **Божбов, В.Е.** Повышение эффективности процесса трелевки путем обоснования рейсовой нагрузки форвардеров / В.Е. Божбов, Д.А. Ильюшенко, Е.Г. Хитров. – СПб: СПбГЛТУ, 2015. – 119 с.
7. **Божбов, В.Е.** Повышение эффективности процесса трелевки путем обоснования рейсовой нагрузки форвардеров. Дисс. ... к-та технических наук. – Архангельск, Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, 2015 – 165 с.
8. **Сивков, Е.Н.** Корреляционная зависимость времени трелевки от интервалов времени на погрузочно-выбракочные операции форвардера // Научные чтения. Сборник материалов научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава Сыктывкарского лесного института по итогам научно-исследовательской работы в 2008 г. – Сыктывкар, Изд-во Сыктывкарского лесного института, 2009. С. 527-531.
9. **Суханов, Ю.В.** Имитационное моделирование операций трелевки форвардером: алгоритмы и реализация / Ю.В. Суханов, А.А. Селиверстов, А.П. Соколов, С.Н. Перский // Труды лесинженерного факультета ПетрГУ. 2012. Т. 9. № 1. С. 58-61.
10. **Ширнин, А.Ю.** Машина для комбинированной трелевки древесины на базе форвардера и анализ ее производительности / А.Ю. Ширнин, И.В. Зверев // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая. 2014. № 2. С. 218-223.
11. **Хитров, Е.Г.** Изучение производительности трелевки форвардером / Р.С. Беспалов, Д.О. Диваков, А.Ф. Эйвазов, К.А. Козловская // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2022 г. – СПб: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2023. С. 78-83.
12. **Эйхлер, Л.В.** Теоретическое осмысление интеграционных процессов на транспорте (на примере автомобильного транспорта) // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 365. С. 125-132.
13. **Shtepa, A.A.** Application of selection criteria in management decision forecasting models at road transport enterprises / A.A. Shtepa, A.V. Ivanova // Перспективы развития и основные вопросы в науке. Материалы Национальной научно-практической конференции. Воронеж, 15 марта 2023. – Воронеж: ВГЛТУ, 2023. С. 68-75.
14. **Епишкин, В.Е.** Совершенствование методики расчета предприятий автомобильного транспорта // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства. Труды IV международной научно-технической конференции (Резниковские чтения). Тольятти, 27-29 мая 2015 г. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2015. С. 169-175.
15. **Клоков, Д.В.** Обоснование параметров и оценка динамических показателей лесной колесной погрузочно-транспортной машины. Автореферат дисс. ... канд. технических наук / Белорусский государственный технологический университет. – Мн.: БГТУ, 2001. – 21 с.
16. **Клоков, Д.В.** Оценка энергетических параметров лесной погрузочно-транспортной машины / А.А. Ермалицкий // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2005. № 12. С. 138-142.

17. **Войнаш, С.А.** Обоснование параметров малогабаритной погрузочно-транспортной машины / С.А. Войнаш, А.С. Войнаш // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 3 (13). С. 138-141.
18. **Шор, Н.З.** Применение метода градиентного спуска для решения сетевой транспортной задачи // Материалы на науч. семинара по теорет. и прикл. вопр. кибернетики и исследования операций: Науч. совет по кибернетике АН УССР. Киев, 1962. Вып. 1. С. 9-17.
19. **Шор, Н.З.** Методы минимизации недифференцируемых функций и их приложения. – Киев: Наукова думка, 1979. – 199с.
20. Методы сплайн-функций. Российская конференция, посвященная 80-летию со дня рождения Ю.С. Завьялова (Новосибирск, 31 января – 2 февраля 2011 г.): Тез. докладов / ИМ СО РАН. Новосибирск, 2011. – 113 с.
21. **Соколинская, И.М.** Синтез симплекс-метода и метода линейной коррекции в задачах линейной оптимизации с неформализованными ограничениями // Вычислительные методы и программирование. 2005. Т. 6. № 1. С. 226-238.
22. **Свалов, Д.В.** Сравнительный анализ эффективности симплекс-метода и метода минимальных путей на примере решения многопродуктовой транспортной задачи / Д.В. Свалов, С.И. Файнштейн //Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2011. Т. 2. № 69. С. 79-81.
23. **Карташов, Б.А.** Среда динамического моделирования технических систем SIMINTECH. Практикум по моделированию систем автоматического регулирования. / Б.А. Карташов, Е.А. Шабаев, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 424 с.
24. **Хабаров, С.П.** Основы моделирования технических систем. Среда SIMINTECH / С.П. Хабаров М.Л. Шилкина. – СПб: Лань, 2022. – 120 с.

*Дата поступления
в редакцию: 29.02.2024*

*Дата принятия
к публикации: 27.05.2024*