

**А.Х. Мохамед, Н.А. Тюрин**

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЛЕСНОГО ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

*Введение.* Все возрастающее разнообразие номенклатуры дорожно-строительных машин и технологий лесного дорожного строительства при широкой гамме грунтово-гидрологических характеристик арендуемых лесных массивов акцентируют внимание на вопросах рациональной организации дорожно-строительных работ. Сложность вопросов организации дорожно-строительных работ проявляется также и в значительной сезонной изменчивости условий их проведения, обусловленной климатическими закономерностями региона [Fu, 2012; Koch, Nare & Lucet, 2011].

В реальных условиях производства дорожно-строительная организация имеет ограниченные ресурсы. Расчет рационального (оптимального) использования имеющихся дорожно-строительных машин и комплексов на конкретных объектах лесовозных дорог является составной частью технической подготовки лесозаготовительного производства.

Следует отметить, что оптимальная организация дорожно-строительных работ встречается ряд затруднений и не всегда может быть полностью осуществлена. Во-первых, нет еще достаточно полно разработанных научных методов комплектования механизированных отрядов для выполнения дорожно-строительных работ [Agüera, Aguilar, Aguilar, Carvajal, 2007]. Во-вторых, промышленность, как правило, выпускает отдельные виды дорожно-строительных машин, а не их комплекты с заранее согласованными производительностью и другими качественными характеристиками их взаимодействия в строительном потоке. Появившаяся возможность закупки зарубежных дорожно-строительных машин еще более усложняет формирование оптимальной организации дорожно-строительных работ. В-третьих, часто необходимо учитывать состав только наличного парка дорожно-строительных машин лесозаготовительного предприятия или подрядной дорожно-строительной организации и искать пути их рационального использования. Далеко не всегда выделение дополнительных капиталовложений для приобретения новых машин будет экономически оправдано. В то же время дорожно-строительная организация, как правило, имеет широкую

возможность аренды дорожно-строительной техники, а также привлечение сезонной рабочей силы.

В реальных условиях каждый леспромхоз или подрядная дорожно-строительная организация, как правило, располагают своими парками дорожно-строительных машин и необходимо их оптимальное распределение по объектам строительства. Разница в производительности дорожно-строительных машин, последовательно работающих в комплексном потоке, вызывает необоснованные простои машин с высокой производительностью. При дефиците ресурсов отдельных дорожно-строительных машин в потоке, вынуждены простаивать и все комплектующие поток машины. Целью настоящей работы является разработка математической модели оптимизации дорожно-строительных работ в изменчивых природно-производственных условиях объектов строительства и наличных парков строительных машин в подразделениях строительной организации.

*Методика исследования.* Программа дорожно-строительных работ строительной организации включает  $i = 1 \dots m$  видов работ (объектов) с соответствующими объемами их выполнения  $Q_i$ . Имеющаяся в дорожно-строительной организации номенклатура комплектов дорожно-строительных машин ( $q = 1 \dots n$ ) задана. Известно количество дорожно-строительных машин каждого типоразмера  $N_j$  ( $j = 1 \dots k$ ). Плановые объемы работ должны быть выполнены в срок, не превышающий директивный  $T_0$ .

Введем следующие дополнительные обозначения:

$C_{iqj}^r$  – приведенные часовые затраты при работе  $j$ -й машины в  $q$ -м комплексе на  $i$ -м объекте, руб./маш-ч;

$C_j^p$  – приведенные часовые затраты при простое  $j$ -й машины, руб./маш-ч;

$t_{iqj}$  – норма времени  $j$ -й машины в  $q$ -м комплексе при работе на  $i$ -м объекте, ч;

Исходные данные задачи могут быть представлены в виде матрицы, см. табл. 1.

Следует отметить, что число столбцов матрицы равно числу имеющихся комплектов дорожно-строительных машин; строки же отражают объекты дорожно-строительных работ в м<sup>3</sup> разработки и перемещения грунтов по трассе строящейся лесовозной дороги  $Q_i$ , полученные на основании графика распределения земляных масс.

Таблица 1

**Матрица исходных данных задачи**

Виды дорожно-строительных работ	Имеющиеся комплекты дорожно-строительных машин				Объемы работ
	1	2	... <i>q</i> ...	<i>n</i>	
1					$Q_1$
· <i>i</i> ·			$t_{iqi} C_{iqi}^r$ $C_j^p X_{qi}$		$Q_i$
· <i>m</i>					$Q_m$

Результатом решения задачи должны быть значения следующих переменных, которые обеспечивают минимум приведенных затрат на выполнение работ в срок, не превышающий директивный  $T_0$ :

$x_{qi}$  – объем работ в м<sup>3</sup> выполняемых *q*-й системой машин на *i*-м объекте;

$x_j^r$  – недоиспользованный фонд времени (резерв) *j*-й машины в машино-часах;

$x_j^d$  – недостаток (дефицит) фонда времени машины *j* в машино-часах.

Резерв фонда времени машины означает, что данная машина недогружена и возможен ее простой; дефицит фонда времени машины означает, что фонда полезного времени машины *j* недостаточно для выполнения заданного объема работ в установленные директивные сроки.

В первом случае число машин типа *j*, которые являются лишними в составе заданной системы, может быть определено по формуле

$$N_{rj} = X_j^r / T_{0j}, \tag{1}$$

где  $T_{0j}$  – полезный фонд рабочего времени машины *j* в период планируемого директивного срока  $T_0$ .

Аналогично количество машин *j*, которых недостаточно в составе данного комплекта для выполнения намеченного объема работ в директивные сроки  $T_0$ , определяется по формуле

$$N_{dj} = X_j^d / T_{0j}. \tag{2}$$

В описанной постановке задача может быть сформулирована следующим образом: минимизировать приведенные затраты на организацию дорожно-строительных работ

$$C = \sum_{i=1}^m \sum_{q=1}^n \sum_{j=1}^k C_{iqj}^r t_{iqj} X_{qi} + \sum_{j=1}^k \left( C_j^p X_j^r + \sum_{j=1}^{k-1} C_j^d X_j^d \right) \rightarrow \min. \quad (3)$$

При ограничениях

$$\sum_{i=1}^m t_{jq_i} X_{qi} + X_j^r - X_j^d = N_j T_{oj} \quad (q = 1 \dots n; \quad j = 1 \dots k), \quad (4)$$

$$\sum_{q=1}^n X_{qi} = Q_i \quad (i = 1 \dots m), \quad (5)$$

$$X_{qi} \geq 0; \quad X_j^r \geq 0; \quad X_j^d \geq 0. \quad (6)$$

В уравнении целевой функции (3) первое слагаемое – суммарные приведенные затраты непосредственно на выполнение дорожно-строительных работ. Второе слагаемое – дополнительные затраты (штраф) за неполное использование (недозагрузку) машин типа  $j$  в комплекте ( $X_j^r$ ) и за дефицит фонда рабочего времени машины  $j$  в комплекте ( $X_j^d$ ), что влечет за собой вынужденный простой остальных машин  $k-1$ , входящих в комплект.

Смысл ограничения (4) состоит в том, что общее время работы и простоя любой машины на всех объектах равно общему фонду ее рабочего времени. Полезный фонд рабочего времени  $j$ -й машины за период директивного срока  $T_o$  составит

$$T_{oj} = T_o (1 - K_j), \quad (7)$$

где  $K_j$  – коэффициент ремонтов  $j$ -й машины.

Коэффициент ремонтов в свою очередь может быть определен по выражению

$$K_j = \frac{1}{T_c} (T_{об} t_{об} + T_{рем} t_{рем}) S, \quad (8)$$

где  $T_c$  – продолжительность межремонтного цикла, ч;  $T_{об}$  – количество техобслуживаний за период  $T_c$ ;  $T_{рем}$  – количество текущих ремонтов за период  $T_c$ ;  $t_{об}$  – количество дней простоя в техническом обслуживании;  $t_{рем}$  – количество дней простоя в текущем ремонте;  $S$  – количество часов работы машины в смену по принятому режиму, ч.

Директивная возможная продолжительность дорожно-строительных работ в планируемый календарный период определяется по формуле

$$T_o = (T_k - T_b - T_m) S K_{cm} \frac{l}{L}, \quad (9)$$

где  $T_k$  – календарная продолжительность строительного сезона, дней;  $T_b$  – количество выходных и праздничных дней в планируемый период;  $T_m$  – количество нерабочих дней по метеоусловиям;  $K_{cm}$  – коэффициент сменности;  $l$  – протяженность рассматриваемого объекта строительства дороги, км;  $L$  – общая длина строящейся автодороги по заданию, км.

Ограничение (5) полученной математической модели позволяет обеспечить выполнение всех видов работ в требуемом объеме, а тривиальные ограничения (6) – исключают получение при решении задачи отрицательных переменных.

Следует отметить, что полученная математическая модель может быть легко трансформирована в модель при условии отсутствия возможности приобретения или аренды дополнительной техники путем исключения из целевой функции переменной  $X_{dq}$ , обозначающей дефицит рабочего времени  $j$ -й машины. В этом случае ограничение (4) будет выглядеть как

$$\sum_{i=1}^m f_{jq} X_{qi} + X_j^r \leq N_j T_{oj}. \quad (10)$$

*Результаты исследования.* Разработанная математическая модель является линейной. Для ее реализации на ЭВМ может быть использован симплекс-метод линейного программирования.

Рассмотрим применение разработанной модели на практической задаче организации дорожно-строительных работ. Задан имеющийся состав машин на строительстве дороги: бульдозеры ДЗ-171 – 2 шт., прицепные скреперы ДЗ-74 с трактором Т-100 – 6 шт., самоходные скреперы ДЗ-115 – 6 шт., катки ДУ-37 – 3 шт., автогрейдеры ДЗ-31 – 1 шт.

Директивный срок земляных работ на объекте задан и составляет  $T_o = 448$  ч. Разновидности земляных работ на объекте и их объемы известны и представлены в исходной матрице табл. 2. Заполненными в матрице являются клетки технически осуществимых способов работ, полученные путем оптимизации графика распределения земляных масс строящейся лесовозной дороги.

Определение приведенных затрат по каждому комплекту машин (правый верхний угол матрицы исходных данных) определен на основании ЕНиР на земляные работы\* и приведенных затрат по каждой машине (табл. 3).

---

\* Дорожные работы (редакция 1979 г.), Единые нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы: сборник 17. М., 1979.

Таблица 2

**Матрица исходных данных**

**The data entering matrix**

Объекты работ по трассе дороги	Машины комплекта						Объем работ, м <sup>3</sup>
	ДЗ-171, ДУ-37, ДЗ-31		ДЗ-74, ДЗ-171, ДУ-37, ДЗ-31		ДЗ-115, ДЗ-171, ДУ-37, ДЗ-31		
Возведение насыпи из выемки	1207,83		2138,58		2979,52		48180
	2,03	$X_1$	3,29	$X_2$	3,10	$X_3$	
	0,28		0,02		0,02		
0,43	0,28		0,28				
Разработка выемки в кавальер	834,33		942,72		-		12840
	2,03	$X_4$	1,75	$X_5$			
Возведение насыпи из карьера	-		3441,87		3884,81		85550
			5,84	$X_6$	4,25	$X_7$	
			0,11		0,11		
			0,43		0,43		
		0,08	0,08				
Возведение насыпи из бокового резерва	952,8		1217,43		-		44450
	1,63	$X_8$	1,55	$X_9$			
	0,43		0,26				
	0,09		0,43				
			0,09				

Таблица 3

**Приведенные затраты и фонд рабочего времени по дорожно-строительным машинам**

**Reduction of the cost and working time for road construction equipments**

Марка машины	Фонд рабочего времени, ч	Приведенные затраты, руб./маш.смена.	
		в работе	в простое
Бульдозеры ДЗ-171	395	3288	2656
Скреперы ДЗ-74	399	4272	3568
Скреперы ДЗ-115	399	6704	4424
Катки ДУ-37	405	4464	3168
Автогрейдеры ДЗ-31	394	3816	2520

Например, для верхней левой клетки матрицы (см. табл. 2) приведенные затраты определяются следующим образом:

$$C_{11} = 3288/8 \cdot 2,03 + 4464/8 \cdot 0,43 + 3816/8 \cdot 0,28 = 1207,83 \text{ руб./маш.ч.}$$

Суммарные приведенные затраты в соответствии с целевой функцией (3) определяются из выражения

$$\begin{aligned} C = & 1207,83 X_1 + 2138,58 X_2 + 2979,52 X_3 + 834,33 X_4 + 942,72 X_5 + \\ & + 3441,87 X_6 + 3884,81 X_7 + 952,80 X_8 + 1217,43 X_9 + 332 X_{10} + 446 X_{11} + \\ & + 553 X_{12} + 396 X_{13} + 315 X_{14} + 1710 X_{15} + 1596 X_{16} + 1489 X_{17} + \\ & + 1646 X_{18} + 1727 X_{19} \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Директивный срок проведения строительных работ

$$T_0 = (T_k - T_v - T_m) SK_{cm} \frac{L}{L} = (150 - 43 - 2) 8 \cdot 1 \cdot \frac{16}{30} = 448 \text{ ч.}$$

Полезный фонд рабочего времени, рассчитанный на одну дорожную машину, в соответствии с (7) и (8) приведен в табл. 3. Тогда ограничения модели по ресурсам на всю номенклатуру дорожных машин в соответствии с (4) составят:

$$\text{Бульдозеры ДЗ-171: } 2,03X_1 + 0,02X_2 + 0,02X_3 + 2,03X_4 + 0,02X_5 + 0,11X_6 + 0,11X_7 + 1,63X_8 + 0,26X_9 + X_{10} - X_{15} = 789;$$

$$\text{Скреперы ДЗ-74: } 3,29X_2 + 1,75X_5 + 5,84X_6 + 1,55X_9 + X_{11} - X_{16} = 2459;$$

$$\text{Скреперы ДЗ-115: } 3,1X_3 + 4,25X_7 + X_{12} - X_{17} = 2395;$$

$$\text{Катки ДУ-37: } 0,43X_1 + 0,43X_2 + 0,43X_3 + 0,43X_6 + 0,43X_7 + 0,43X_8 + 0,43X_9 + X_{13} - X_{18} = 1216;$$

$$\text{Автогрейдеры ДЗ-31: } 0,28X_1 + 0,28X_2 + 0,28X_3 + 0,08X_6 + 0,08X_7 + 0,09X_8 + 0,09X_9 + X_{14} - X_{19} = 394.$$

Ограничения модели по объемам в соответствии с уравнением (5) составят:

$$X_1 + X_2 + X_3 = 48 \ 180;$$

$$X_4 + X_5 = 12 \ 840;$$

$$X_6 + X_7 = 85 \ 550;$$

$$X_8 + X_9 = 44 \ 450.$$

В результате решения поставленной задачи на ЭВМ получены данные, представленные в табл. 4.

Таблица 4

## Матрица результатов решения

## Matrix of the solved results

Объекты работ по трассе дороги	Машины комплекта и объем работы			Объем работ, м <sup>3</sup>
	ДЗ-171, ДУ-37, ДЗ-31	ДЗ-74, ДЗ-171, ДУ-37, ДЗ-31	ДЗ-115, ДЗ-171, ДУ-37, ДЗ-31	
Возведение насыпи из выемки	$X_1 = 48180$	$X_2 = 0$	$X_3 = 0$	48180
Разработка выемки в кавальер	$X_4 = 0$	$X_5 = 12840$	–	12840
Возведение насыпи из карьера	–	$X_6 = 26470$	$X_7 = 59080$	85550
Возведение насыпи из бокового резерва	$X_8 = 0$	$X_9 = 44450$	–	44450

Данное решение получено при возможности приобретения или аренды любых дорожно-строительных машин. Приведенные затраты по целевой функции составляют 5 534 264,17 руб. Оптимальное количество бульдозеров – 4 шт., скреперов ДЗ-74 – 6 шт., скреперов ДЗ-115 – 7 шт., катков – 2 шт., автогрейдеров – 1 шт. Требуется приобретение (аренда) двух бульдозеров ДЗ-171, дефицит фонда рабочего времени которых составляет  $X_{10} = 401$  ч и одного самоходного скрепера ДЗ-115, дефицит фонда рабочего времени которого составляет  $X_{17} = 116$  ч. При этом высвобождается и может быть использован на других работах или объектах 1 каток ДУ-37, не использованный фонд рабочего времени которого составляет  $X_{13} = 450$  ч.

*Выводы.* Рекомендации по расчету состава комплекта машин, входящих в технологический поток, способствуют повышению качества решений, принимаемых в процессе планирования и управления дорожно-строительным производством, эффективному использованию всех имеющихся на предприятии дорожно-строительных машин и механизмов.

## Библиографический список

Agüera F.A.G., Aguilar F.J., Aguilar M.A., Carvajal F. Minimising the Earthwork Cost in the Construction of Irrigation Offstream Reservoirs, 2007. P. 375–397. URL: <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9021-7>



*Fu J.* A Microscopic Simulation Model for Earthmoving Operations // *Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2012. No. 6(7).

*Hare W., Koch V., Lucet Y.* Models and algorithms to improve earthwork operations in road design using mixed integer linear programming // *European Journal of Operational Research*. 2011.. 215. P. 470–480. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.06.011

### References

*Agüera F.A.G., Aguilar F.J., Aguilar M.A., Carvajal F.* Minimising the Earthwork Cost in the Construction of Irrigation Offstream Reservoirs, 2007, pp. 375–397. URL: <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9021-7>

*Fu J.* A Microscopic Simulation Model for Earthmoving Operations. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2012, no. 6(7).

*Hare W., Koch V., Lucet Y.* Models and algorithms to improve earthwork operations in road design using mixed integer linear programming. *European Journal of Operational Research*, 2011, 215, pp. 470–480. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.06.011

*Материал поступил в редакцию 12.04.2019 г.*

---

**Мохамед А.Х., Тюрин Н.А.** Оптимизация организации лесного дорожного строительства // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2019. Вып. 227. С. 199–208. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.199-208

Основной целью работы является оптимизация использования машин для земляных работ в строительстве лесных дорог по критерию минимума приведенных расходов, путем оптимального распределения комплектов машин по объектам строительства при условии возможности аренды каких-либо дополнительных машин. Создана экономико-математическая модель расчета эффективной структуры парка машин с точки зрения системы производственной эксплуатации, которая складывается из эффектов всех специализированных комплектов машин и эффекта от передачи машин парка в аренду. Учет возможности передачи или получения техники в аренду позволяет улучшить технико-экономические показатели эксплуатации парка машин. Результаты работы могут быть востребованы лесозаготовительными и дорожно-строительными предприятиями в период проектирования производства земляных работ, обновления машинных парков, а также при выборе наилучшего варианта использования имеющегося парка, прогнозирования продолжительности и стоимости ведения механизированных работ.

**Ключевые слова:** оптимизация использования дорожных машин, земляные работы, комплектация дорожных машин, приведенные расходы, аренда дорожных машин.

**Mohamed A.Kh., Turin N.A.** Optimization of the organization of the forest road construction. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2019, is. 227, pp. 199–208 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.199-208

The main purpose of this work is to optimize the earthmoving machinery utilization in the forest road construction, by minimize the operating cost. That goal may achieve by the optimal distribution of the machine combination in the construction sites, with the ability of renting additional machines. Economical mathematical model has been developed for calculating the effective structure of the machine group to achieve the required productivity. The possibility of hire and rent machines allows the manager to improve the technical economic decision for the machines operation. By using the developed model it can gives good results to having better decisions for planning and designing the earth working operations in the road construction companies, renovation of the machine parks, as well as the choosing the best option for using the existing machine combination, predicting the duration and predicting the cost of the whole work.

**Key words:** optimizing the utilization of the road construction machine, earth working, combination of the road construction machines, cost minimization, the rent of road construction equipment.

---

**МОХАМЕД Ахмед Халед Абдельвахаб** – аспирант кафедры промышленного транспорта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ah.abdelwahab@fagr.bu.edu.eg

**MOHAMED Ahmed Khaled Abdelwahab** – PhD student of «Industrial transport» department, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ah.abdelwahab@fagr.bu.edu.eg

**ТЮРИН Николай Александрович** – профессор кафедры промышленного транспорта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: tnalif@mail.ru

**TURIN Nikolay A.** – PhD (Technical), Professor of «Industrial transport» department, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: tnalif@mail.ru