

УДК 69.003.13

Щепин Павел Дмитриевич

инженер

E-mail: schepin-pavel@yandex.ru

ООО «Регион-Подряд»

Адрес организации: 614089, Россия, г. Пермь, ул. Кронштадтская, д. 35, оф. 2

Вахрушев Сергей Иванович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: siv18_57@mail.ru

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Адрес организации: 614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29

Выбор оптимального комплекса машин для земляных работ при укреплении участка берега реки Большая Мысья Пермского края

Аннотация

Постановка задачи. Целью работы является оптимальное комплектование строительных машин, выполняющих разнородные технологические операции для заданного производственного процесса в условиях полной определенности.

Результаты. В ходе проведения численных исследований оптимального комплектования строительных машин определяются удельные затраты на производство работ. Расчет основан на методе динамического программирования и принципе оптимальности Р.Э. Беллмана. Задача оптимизации упрощается путем локального поиска оптимального решения, то есть вся система разбивается на части и для каждой части производится поиск минимального значения затрат. Алгоритм расчета разработан в системе автоматизированного проектирования MathCAD. Программа позволяет изменять исходные данные, чтобы рассчитать любой комплекс машин, по выбранному критерию оптимизации.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что при оптимальном комплектовании строительных машин минимизируются расходы на производство работ. За счет расчета с помощью программы уменьшается время для подбора оптимального комплекса машин и увеличивается степень автоматизации проектирования.

Ключевые слова: оптимизация, комплекс машин, MathCAD, программа, оптимальный комплекс машин, динамическое программирование, Беллман.

Для цитирования: Щепин П. Д., Вахрушев С. И. Выбор оптимального комплекса машин для земляных работ при укреплении участка берега реки Большая Мысья Пермского края // Известия КГАСУ. 2020. № 3 (53). С. 56–64.

1. Введение

Современная строительная отрасль имеет высокую степень автоматизации работ с помощью различных машин и механизмов, имеющих разнообразное рабочее оборудование и технические характеристики для выполнения определенных операций [1-4]. Оптимизация – это процесс максимизации выгоды и минимизации расходов [5-7]. Как правило, на объекте строительства критерием оптимизации являются денежные средства. Так как механизация строительного процесса земляных работ достигает 90 %, то уменьшения капиталовложений можно достичь путем выбора оптимальных машин, комплектов машин, комплексов машин и систем машин [8, 9]. Выбор оптимальных средств механизации позволяет добиться значительной экономии при возведении объекта. Если же приоритетным критерием оптимизации является время строительства, то, аналогично стоимости, можно добиться минимизации времени производства работ.

Актуальность работы заключается в сокращении затрат ресурсов на выполнение производственного процесса земляных работ по укреплению участка берега реки Большая Мысья Пермского края при прокладке нефтепровода посредством выбора оптимального комплекса машин [1-3].

В свою очередь, количественный состав строительных машин зависит от сложности и продолжительности технологического процесса земляных работ. Кроме того, величина возможных вариаций комплексов машин в составе технологического процесса зависит от суммы отдельных технологических операций, выполняемых машинами, и числа вариантов сравниваемых машин на каждой операции [2]. Аналитический расчет путем перебора всех вариантов нецелесообразен и решение задачи оптимизации предлагается реализовать в системе автоматизированного проектирования MathCAD.

2. Материалы и методы

Постановка задачи и выбор исходных данных

Объект исследования представляет собой участок реки Большая Мысья в Красновишерском районе Пермского края. Производственный процесс земляных работ при укреплении берега реки последовательно выполняется следующими технологическими операциями:

1. Срезка почвенно-растительного слоя с береговой полосы бульдозером;
2. Разработка грунта одноковшовым экскаватором;
3. Разработка грунта из-под воды экскаватором-драглайн;
4. Транспортировка грунта на вывоз автосамосвалом;
5. Вертикальная планировка поверхности бульдозером;
6. Установка георешетки и заполнение щебнем экскаватором.

Каждая из перечисленных технологических операций может быть выполнена несколькими вариантами строительных машин, одинаковых по массово-габаритным характеристикам, но имеющих небольшое различие по производительности, трудоемкости выполнения операций и затратам на эксплуатацию машин. Таким образом, суммарные затраты на выполнение производственного процесса различными комбинациями машин будут отличаться. Требуется сформировать комплекс строительных машин, который гарантирует минимальные суммарные затраты на выполнение всего технологического процесса.

Для решения задачи оптимизации в условиях полной определенности в качестве исходных данных приняты технические характеристики машин отечественного и зарубежного производства, а также нормы времени в маш.-см. на разработку одного кубометра грунта. Трудоемкости земляных работ на каждую технологическую операцию определены в соответствии с требованиями ГЭСН 81-02-01-2001. Сравнимые комплекты строительных машин для каждого операционного процесса представлены в табл. 1.

Таблица 1
Комплекты строительных машин с характеристиками затрат на разработку 1 м³ грунта

№ п/п	Отдельные технологические операции производственного процесса	Марки машин	Затраты на 1 м ³ , руб
1	Срезка почвенно-растительного слоя с береговой полосы бульдозером	Caterpillar D3G LGP	197,23
		Komatsu D31P-20	188,61
		Shantui SB08-3	276,28
2	Разработка грунта одноковшовым экскаватором	Hitachi ZX160LC-5G	238,02
		Caterpillar 205	180,34
		Liebherr R 900 C	231,77
3	Выемка грунта из-под воды экскаватором-драглайном	ЭО-5116-1	2643,95
		ЭО-5111Б	2003,25
		ЭО-4112-А	2574,49
4	Транспортировка грунта на вывоз автосамосвалом	КАМАЗ 6520-60	447,17
		VOLVO FMX 6x4	867,71
		МАЗ-6517	547,16
5	Вертикальная планировка поверхности бульдозером	Komatsu D65E-12	24,51
		ЧТЗ Т-130	21,64
		Caterpillar D6R	34,34
6	Установка георешетки и заполнение щебнем экскаватором	Caterpillar 907K	700,25
		Komatsu WA120-3	708,55
		JCB 3CX	702,51

3. Результаты

Оптимальное комплектование машин может осуществляться разными методами. Один из наиболее эффективных методов решения задачи оптимизации выполняется на основе принципа оптимальности Беллмана [4], согласно которому оптимальный выбор обладает тем свойством, что каковы бы ни были первоначальное состояние и решение в начальный момент, последующие решения должны быть оптимальными. Данный метод дает возможность заменить перебор всех вариантов определенной системой действий, при которых отыскание экстремума многих переменных заменяется многократным отысканием экстремума функции одной переменной [14-16].

Расчет с помощью метода Беллмана

Выбор оптимального комплекса машин для земляных работ осуществляется поэтапно. На начальном этапе пошагово решается задача оптимизации для частичных комплексов машин, начиная с последней технологической операции.

В качестве математической модели используется функциональное (рекуррентное) уравнение Беллмана, которое позволяет решить оптимизационную задачу:

$$E(i - 1, j) = \min_{k=1,2,\dots,m_i} [C(i, j, k) + E(i, k)], \tag{1}$$

где $E(i-1, j)$ – суммарные минимальные затраты для частичного комплекса машин, участвующего в выполнении частичного технологического процесса, после предыдущей (i-1)-ой операции с j-ой машиной;

$E(i, k)$ – то же после текущей i-ой операции с k-ой машиной;

$C(i, j, k)$ – приращение минимальных затрат при выполнении текущей i-й технологической операции с k-ой машиной.

На заключительном этапе производится представление всех возможных вариантов комплексов машин в виде сетевого графа, который обеспечивает не только визуализацию формирования допустимого множества машин, а также решение задачи по определению кратчайшего пути от одной из вершин графа до всех остальных (алгоритм Дейкстры) [2, 4].

Сетевой граф выполнен для всего производственного процесса, состоящего из семи технологических операций, из которых последняя операция включает фиктивные машины и предназначена для удобства решения оптимизационной задачи (рис. 1).

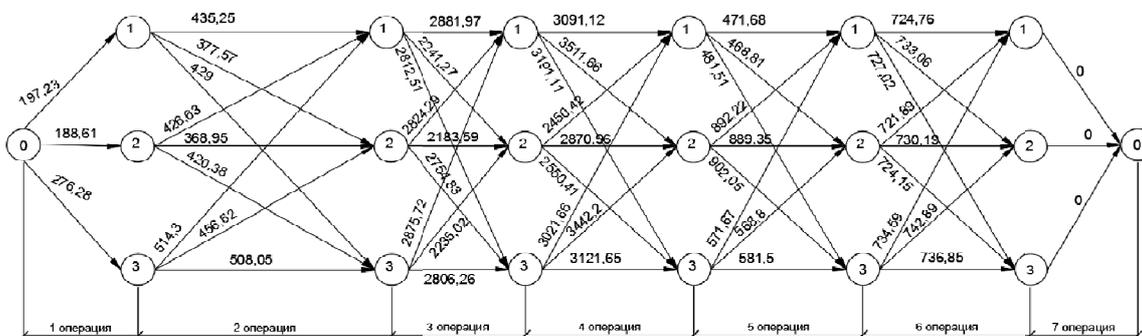


Рис. 1. Сетевой граф производственного процесса (иллюстрация авторов)

Каждая технологическая операция может быть выполнена тремя вариантами машин. В вершинах графа обозначены номера вариантов используемых машин, причем начальная и конечная вершины сетевого графа представляют собой фиктивные машины. Численные затраты на разработку одного кубометра грунта теми или иными машинами показаны над стрелками. Количество возможных комплексов машин для заданного технологического процесса составит $P = 3^6 = 729$ различных вариантов.

Расчет критерия оптимизации для частичных комплексов машин проведен в обратной последовательности, начиная с машин, выполняющих последнюю операцию. Первый этап расчета считается законченным после определения минимального значения критерия оптимизации для частичных комплексов и представления полученных значений над вершинами графов. Второй этап выполняется пошагово в прямой последовательности, начиная с поиска оптимальной машины, выполняющей первую

технологическую операцию. Здесь учитывались минимальные численные значения затрат на разработку одного кубометра грунта, показанные над стрелками.

Решение задачи оптимизации произведено с помощью системы автоматизированного проектирования MathCAD. Алгоритм решения представлен ниже.

M_k – матрица затрат на k -ую операцию, где i -строка, определяет номер машины, выполняющей следующую операцию, j -столбец, определяет номер машины, выполняющей текущую операцию.

Матрица затрат на засыпку георешетки щебнем и планировку площадки бульдозером:

$$M_1 = \begin{pmatrix} 724.76 & 721.89 & 734.59 \\ 733.06 & 730.19 & 742.89 \\ 727.02 & 724.15 & 736.85 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Матрица затрат на планировку поверхности бульдозером и транспортировку грунта автосамосвалами:

$$M_2 = \begin{pmatrix} 471.68 & 892.22 & 571.67 \\ 468.81 & 889.35 & 568.80 \\ 481.51 & 902.05 & 581.50 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Матрица затрат на транспортировку грунта автосамосвалами и разработку грунта из-под воды экскаватором драглайн:

$$M_3 = \begin{pmatrix} 3091.12 & 2450.42 & 3021.66 \\ 3511.66 & 2870.96 & 3442.20 \\ 3191.11 & 2550.41 & 3121.65 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Матрица затрат на разработку грунта одноковшовым экскаватором и на разработку грунта экскаватором драглайн из-под воды:

$$M_{31} = \begin{pmatrix} 2881.97 & 2824.29 & 2875.72 \\ 2241.27 & 2183.59 & 2235.02 \\ 2812.51 & 2754.83 & 2806.26 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Матрица затрат на разработку грунта одноковшовым экскаватором и на срез растительного слоя бульдозером:

$$M_4 = \begin{pmatrix} 435.25 & 426.63 & 514.30 \\ 377.57 & 368.95 & 456.62 \\ 429.00 & 420.38 & 508.05 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Матрица затрат на срез растительного слоя бульдозерами:

$$M_5 = \begin{pmatrix} 197.23 \\ 188.61 \\ 276.28 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Матрица минимальных затрат на засыпку георешетки щебнем:

$$m1 := \begin{array}{l} \text{for } j \in 0.. \text{rows}(M1) - 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{MIN} \leftarrow M1_{1,j} \\ \text{for } i \in 0.. \text{cols}(M1) - 1 \\ \quad \left| \text{MIN} \leftarrow M1_{i,j} \text{ if } M1_{i,j} < \text{MIN} \\ \quad \left| V_j \leftarrow \text{MIN} \end{array} \right. \end{array} \right. \\ V \end{array} \quad (8)$$

$$M_{1min} = \begin{pmatrix} 724.76 & 724.76 & 724.76 \\ 721.89 & 721.89 & 721.89 \\ 734.59 & 734.59 & 734.59 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Матрица затрат на планировку, засыпку георешетки:

$$m_2 = M_2 + M_{1min} = \begin{pmatrix} 1196.44 & 1616.98 & 1296.43 \\ 1190.70 & 1611.24 & 1290.69 \\ 1216.10 & 1636.64 & 1316.09 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Матрица минимальных затрат на планировку, засыпку георешетки:

$$m2min := \begin{array}{l} \text{for } j \in 0.. \text{rows}(m2) - 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{MIN} \leftarrow m2_{1,j} \\ \text{for } i \in 0.. \text{cols}(m2) - 1 \\ \quad \left| \text{MIN} \leftarrow m2_{i,j} \text{ if } m2_{i,j} < \text{MIN} \\ \quad \left| I_j \leftarrow \text{MIN} \end{array} \right. \end{array} \right. \\ I \end{array} \quad (11)$$

$$M_{2min} = \begin{matrix} 1190.70 & 1190.70 & 1190.70 \\ 1611.24 & 1611.24 & 1611.24 \\ 1290.69 & 1290.69 & 1290.69 \end{matrix} \quad (12)$$

Матрица затрат на засыпку, планировку, транспортировку грунта:

$$m_3 = M_3 + M_{2min} = \begin{matrix} 4281.82 & 3641.12 & 4212.36 \\ 5122.90 & 4482.20 & 5053.44 \\ 4481.80 & 3841.10 & 4412.34 \end{matrix} \quad (13)$$

Матрица минимальных затрат на засыпку, планировку, транспортировку грунта автосамосвалами:

$$m3min := \begin{matrix} \text{for } j \in 0..rows(m3) - 1 \\ \quad \left| \begin{matrix} \text{MIN} \leftarrow m3_{1,j} \\ \text{for } i \in 0..cols(m3) - 1 \\ \quad \left| \text{MIN} \leftarrow m3_{i,j} \text{ if } m3_{i,j} < \text{MIN} \\ \quad \left| I_j \leftarrow \text{MIN} \end{matrix} \right. \end{matrix} \right. \end{matrix} \quad (14)$$

$$M_{3min} = \begin{matrix} 4281.82 & 4281.82 & 4281.82 \\ 3641.12 & 3641.12 & 3641.12 \\ 4212.36 & 4212.36 & 4212.36 \end{matrix} \quad (15)$$

Матрица затрат на засыпку, планировку, транспортировку разработку грунта из-под воды:

$$m_{31} = M_{31} + M_{3min} = \begin{matrix} 7163.79 & 7106.11 & 7157.54 \\ 5882.39 & 5824.71 & 5876.14 \\ 7024.87 & 6967.19 & 7018.62 \end{matrix} \quad (16)$$

Матрица минимальных затрат на засыпку, планировку, транспортировку разработку грунта из-под воды:

$$m31min := \begin{matrix} \text{for } j \in 0..rows(m31) - 1 \\ \quad \left| \begin{matrix} \text{MIN} \leftarrow m31_{1,j} \\ \text{for } i \in 0..cols(m31) - 1 \\ \quad \left| \text{MIN} \leftarrow m31_{i,j} \text{ if } m31_{i,j} < \text{MIN} \\ \quad \left| I_j \leftarrow \text{MIN} \end{matrix} \right. \end{matrix} \right. \end{matrix} \quad (17)$$

$$M_{31min} = \begin{matrix} 5882.39 & 5882.39 & 5882.39 \\ 5824.71 & 5824.71 & 5824.71 \\ 5876.14 & 5876.14 & 5876.14 \end{matrix} \quad (18)$$

Матрица затрат на засыпку, планировку, транспортировку разработку грунта из-под воды, разработку грунта одноковшовым экскаватором:

$$m_4 = M_4 + M_{31min} = \begin{matrix} 6317.64 & 6309.02 & 6396.69 \\ 6202.28 & 6193.66 & 6281.33 \\ 6305.14 & 6296.52 & 6384.19 \end{matrix} \quad (19)$$

Матрица минимальных затрат на засыпку, планировку, транспортировку разработку из-под воды, разработку грунта одноковшовым экскаватором:

$$m4min := \begin{matrix} \text{for } j \in 0..rows(m4) - 1 \\ \quad \left| \begin{matrix} \text{MIN} \leftarrow m4_{1,j} \\ \text{for } i \in 0..cols(m4) - 1 \\ \quad \left| \text{MIN} \leftarrow m4_{i,j} \text{ if } m4_{i,j} < \text{MIN} \\ \quad \left| I_j \leftarrow \text{MIN} \end{matrix} \right. \end{matrix} \right. \end{matrix} \quad (20)$$

$$m_{4min} = \begin{matrix} 6202.28 \\ 6193.66 \\ 6281.33 \end{matrix} \quad (21)$$

Матрица суммарных затрат на все операции:

$$m_5 = M_5 + m_{4min} = 6399.51 + 6382.27 = 12781.78$$

$$m_5 = M_5 + m_{4min} = 6382.27 + 6557.61 = 12939.88$$

Обратных ход (определение минимальных затрат на операциях):

$$MIN = 6382.27 \quad 6193.66 \quad 5824.71 \quad 3641.12 \quad 1190.70 \quad 721.89$$

По результатам расчета подобран оптимальный комплекс строительных машин, обозначенный толстыми стрелками (рис. 2).

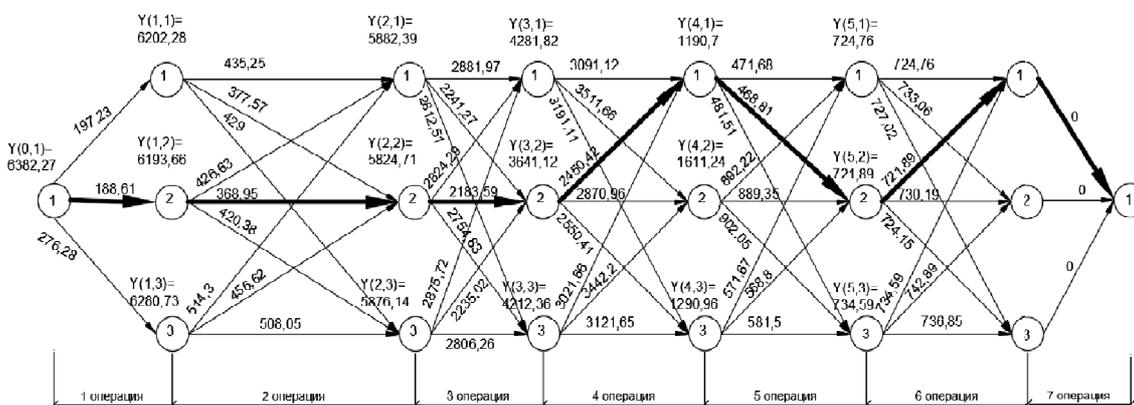


Рис. 2. Оптимальный комплекс машин для земляных работ (иллюстрация авторов)

Оптимальный комплекс машин для производства работ по берегоукреплению с затратами на каждой технологической операции представлен в табл. 2.

Таблица 2

Оптимальный комплекс машин с приведенными затратами на 1 м³ грунта

	Марка машины	Приведенные затраты на 1 м ³ грунта, рублей
Срез растительного слоя	Komatsu D31P-20	188,61
Разработка грунта	Caterpillar 205	180,34
Разработка грунта из-под воды	ЭО-5111Б	2003,25
Транспортировка грунта	КАМАЗ 6520-60	447,17
Планировка поверхности	ЧТЗ Т-130	21,64
Заполнение георешетки	Caterpillar 907K	700,25
Итого:		3541,26

4. Обсуждение

После применения метода динамического программирования Беллмана и создания автоматизированного расчета в системе MathCAD, был получен результат в виде оптимального комплекса машин. За критерий оптимизации была взята приведенная стоимость на 1 м³ грунта. Данный алгоритм расчета позволяет минимизировать математические операции перебора путем введения алгоритма поиска минимальных значений в столбцах матриц. Данный метод имеет ограничения по применению: количество сравниваемых вариантов должно быть одинаково на всех операциях. Это ограничение связано с тем, что складывать можно лишь матрицы одного размера.

Аналогичный подход к данной задаче был использован авторами статей [3, 6, 10], но они использовали алгоритм поиска минимума, написанный на языке программирования.

Заключение

Проведенные научные исследования позволили определить оптимальный комплекс строительных машин. В него вошли:

1. Бульдозер Komatsu D31P-20 на первом этапе срезки почвенно-растительного слоя с береговой полосы бульдозером.

2. Экскаватор одноковшовый Caterpillar 205 на промежуточном этапе разработки грунта одноковшовым экскаватором.

3. Экскаватор-драглайн ЭО-5111Б на промежуточном этапе разработки грунта из-под воды экскаватором-драглайном.

4. Автосамосвал КАМАЗ 6520-60 на промежуточном этапе транспортировки грунта автосамосвалами.

5. Бульдозер ЧТЗ Т-130 на этапе вертикальной планировки поверхности.

6. Фронтальный погрузчик Caterpillar 907К на заключительном этапе заполнения георешетки щебнем.

Таким образом, суммарные приведенные затраты на разработку 1 м³ грунта этими машинами составили 3541,26 руб.

Расчет произведен аналитически с помощью программы MathCAD на основе метода динамического программирования Беллмана. Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что при оптимальном комплектовании строительных машин минимизируются расходы на производство земляных работ.

Список библиографических ссылок

1. Косиков М. С., Вахрушев С. И. Комплект машин для строительства временных фиброгрунтовых дорог на строительной площадке // Техника и технология транспорта. 2019. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N11-31CTC19.pdf> (дата обращения: 01.12.2019).
2. Треногин Е. О., Вахрушев С. И. Опыт оптимизации комплекта строительных машин методом Дейкстры на объекте строительства г. Перми // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии. 2017. URL: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=8&s=431> (дата обращения: 05.12.2019).
3. Fan W., Machemehl R. B., Kortum K. Equipment Replacement Optimization Solution Methodology, Statistical Data Analysis, and Cost Forecasting // Transportation research record. 2011. Vol. 2220. P. 88–98. DOI: 10.3141/2220-11.
4. Демин А. А., Кудрявцев Е. М. Оптимизация комплекса строительных и дорожных машин методом Дейкстры // Вестник МГСУ. 2011. № 8. С. 239–242.
5. Вайнштейн М. С., Жадановский Б. В., Синенко С. А., Афанасьев А. А., Павлов А. С., Ефименко А. З., Долганов А. И. Оценка эффективности организационно-технологических решений при выборе средств механизации производства строительного-монтажных работ // Научное обозрение. 2015. № 13. С. 123–127.
6. Тюрин Н. А., Мохамед А. Х., Потапов Е. М. Оптимизация состава дорожно-строительного комплекса методом динамического программирования : сб. ст. по материалам научно-технической конференции / СПбГЛТУ. СПб., 2018. С. 264–268.
7. Fan W., Machemehl R. B., Gemar M. D. Optimization of Equipment Replacement Dynamic Programming-Based Optimization // Transportation research record. 2012. Vol. 2292. P. 160–170. DOI: 10.3141/2292-19.
8. Kudryavtsev E. M. Automation of optimization of discrete technological processes : 27th Russian-Polish-Slovak Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering / Rostov-on-Don, 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201819604067.
9. Жидкова М. А., Невмержицкая В. В., Козлова Д. С. Оптимизация состава комплектов дорожных машин и критерии эффективности их использования : сб. ст. межвузовской научно-практической конференции магистрантов – Актуальные проблемы экономики и менеджмента / Омский государственный технический университет. Омск, 2017. С. 6–10.
10. Zhang Y., Shen, Z.-J.M., Song, S. Parametric search for the bi-attribute concave shortest path problem // Transportation Research Part B: Methodological. 2016. Vol. 94. P. 150–168. DOI: 10.1016/j.trb.2016.09.009.
11. Duque N., Duque D., Saldarriaga J. Dynamic Programming over a Graph Modeling Framework for the Optimal Design of Pipe Series in Sewer Systems : dig. of art. 8th

- International Conference on Water Distribution Systems / Univ. Andes. Cartagena, 2016. P. 61–68. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.208.
12. Белинская С. И., Медведева И. П. Реализация задачи динамического программирования в среде MathCAD // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. 2010. № 8. С. 12–17.
 13. Синенко С. А., Явовов Д. А. Комплектование строительной техники для производства земляных работ // European research: innovation in science, education and technology. 2018. С. 37–40.
 14. Зайцев Д. В., Невмержицкая В. В., Козлова Д. С. Оценка эффективности комплектов дорожных машин // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2017. № 2 (12). 16 с.
 15. Ямшанова А. А., Ефременко А. С. Совершенствование технологии производства земляных работ на основе оптимизации комплекта машин // Молодежный вестник ИрГТУ. 2018. № 3. С. 29–33.
 16. Пермяков В. Б., Салихов Р. Ф., Мусагитова Г. Н., Левин Н. Ю. Проектирование оптимальных составов комплектов машин для дорожного строительства : сб. ст. 3-ей Международной научно-технической конференции – Проблемы машиноведения / Омский государственный технический университет. Омск, 2019. С. 401–407.

Shchepin Pavel Dmitrievich

engineer

E-mail: schepin-pavel@yandex.ru

LLC «Region-Podryad»

The organization address: 614089, Russia, Perm, Kronstadt st., 126, off. 2

Vakhrushev Sergei Ivanovich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: siv18_57@mail.ru

Perm National Research Polytechnic University

The organization address: 614990, Russia, Perm, Komsomol'skiy ave., 29

The selection of the optimal complex of machines for earthwork while strengthening the section of the bank of the Bol'shaya Mysya river in the Perm region

Abstract

Problem statement. The aim of the work is the optimal picking of construction machines that perform different technological operations for a given process in conditions of complete certainty.

Results. In the course of numerical analysis of the optimal picking of construction vehicles, the unit costs of the works are determined. The calculation is based on the dynamic programming method and the optimality principle created by R.E. Bellman. The optimization task is simplified by a local search for the optimal solution, that is, the entire system is divided into parts and for each part a minimum cost value is searched. The calculation algorithm is developed in the computer-aided design system MathCAD. The program allows us to change the source data to calculate any set of machines, according to the selected optimization criterion.

Conclusions. The significance of the obtained results lies in the fact that with the optimal picking of construction vehicles, the costs of work are minimized. Due to the calculation using the program, the time for selecting the optimal complex of machines is reduced, the rate of automation of design is increased.

Keywords: optimization, complex of machines, MathCAD, program, optimal complex of machines, dynamic programming, Bellman.

For citation: Shchepin P. D., Vakhrushev S. I. The selection of the optimal complex of machines for earthwork while strengthening the section of the bank of the Bol'shaya Mysya river in the Perm region // Izvestija KGASU. 2020. № 3 (53). P. 56–64.

References

1. Kosikov M. S., Vakhrushev S. I. A complex of machines for the construction of temporary fiber roads at a construction site // *Tekhnika i tekhnologiya transporta*. 2019. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N11-31CTC19.pdf> (reference date: 01.12.2019).
2. Trenogin E.O., Vakhrushev S. I. Experience in optimizing a set of construction vehicles using the Dijkstra method at a Perm construction site *Stroitel'stvo i arkhitektura. Opyt i sovremennyye tekhnologii*. 2017. URL: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=8&s=431> (reference date: 05.12.2019).
3. Fan W., Machemehl R. B., Kortum K. Equipment Replacement Optimization Solution Methodology, Statistical Data Analysis, and Cost Forecasting // *Transportation research record*. 2011. Vol. 2220. P. 88–98. DOI: 10.3141/2220-11.
4. Demin A.A., Kudryavtsev E.M. Optimization of a complex of construction and road machines by Dijkstra's method // *Vestnik MGSU*. 2011. № 8. P. 239-242.
5. Weinstein M. S., Zhadanovsky B. V., Sinenko S. A., Afanasyev A. A., Pavlov A. S., Efimenko A. Z., Dolganov A. I. Evaluation of the effectiveness of organizational and technological solutions when choosing means of mechanization of construction and installation works // *Nauchnoye obozreniye*. 2015. № 13. P. 123–127.
6. Tyurin N. A., Mohamed A. Kh., Potapov E. M. Optimization of the composition of the road-building complex by dynamic programming : dig. of art. based on materials of a scientific and technical conference / SPbSFTU. SPb., 2018. P. 264–268.
7. Fan W., Machemehl R. B., Gemar M. D. Optimization of Equipment Replacement Dynamic Programming-Based Optimization // *Transportation research record*. 2012. Vol. 2292. P. 160–170. DOI: 10.3141/2292-19.
8. Kudryavtsev E. M. Automation of optimization of discrete technological processes : 27th Russian-Polish-Slovak Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering / Rostov-on-Don, 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201819604067.
9. Zhidkova M. A., Nevmerzhitskaya V. V., Kozlova D. S. Optimization of the composition of sets of road vehicles and criteria for the effectiveness of their use : dig. of art. based on interuniversity scientific-practical conference of masters Actual problems of economics and management / Omsk State Technical University. Omsk, 2019. P. 6–10.
10. Zhang Y., Shen, Z.-J.M., Song, S. Parametric search for the bi-attribute concave shortest path problem // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2016. Vol. 94. P. 150–168. DOI: 10.1016/j.trb.2016.09.009.
11. Duque N., Duque D., Saldarriaga J. Dynamic Programming over a Graph Modeling Framework for the Optimal Design of Pipe Series in Sewer Systems : dig. of art. 8th International Conference on Water Distribution Systems / Univ. Andes. Cartagena, 2016. P. 61–68. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.208.
12. Belinskaya S. I., Medvedeva I. P. Realization of the task of dynamic programming in the environment of MathCAD // *Informatsionnyye tekhnologii i problemy matematicheskogo modelirovaniya slozhnykh sistem*. 2010. № 8. P. 12–17.
13. Sinenko S. A., Yavonov D. A. Acquisition of construction equipment for earthworks // *European research: innovation in science, education and technology*. 2018. P. 37–40.
14. Zaytsev D. V., Nevmerzhitskaya V. V., Kozlova D. S. Evaluation of the effectiveness of sets of road vehicles // *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2017. № 2 (12). 16 p.
15. Yamshanova A. A., Efremenko A. S. Improvement of earthworks technology based on optimization of a set of machines // *Molodezhnyy vestnik IrGTU*. 2018. № 3. P. 29–33.
16. Permyakov V. B., Salihov R. F., Musagitova G. N., Levin N. U. Designing the optimal composition of sets of machines for road construction : dig. of art. based on 3rd International Scientific and Technical Conference / Omsk State Technical University. Omsk, 2019. P. 401–407.