ОПТИМАЛЬНОЕ КОМПЛЕКТОВАНИЕ МАШИН ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОТЛОВАНА ПОД ВЕРТИКАЛЬНЫЙ СТАЛЬНОЙ РЕЗЕРВУАР ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТИ ОБЪЕМОМ 5000 М³

© А. С. Семин, С. И. Вахрушев

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия*

Строительство зданий и сооружений нефтяного комплекса представляет собой сложный технологический процесс, в состав которого входит производство земляных работ. Строительная техника для производства земляных работ должна соответствовать как техническим характеристикам для выполнения поставленных задач при определенных внешних условиях, так и экономическим показателям. В статье рассматривается вопрос оптимального комплектования строительных машин при разработке котлована под вертикальный стальной резервуар (РВС). Разработана программа для поиска оптимального комплекта машин, в условиях полной определенности. Расчет основан на методе динамического программирования Дейкстры. В качестве критерия оптимизации выбраны приведенные затраты на единицу одного кубометра строительной продукции. Расчет представлен для каждого этапа производства работ. По результат расчета построен сетевой граф с выбором оптимального комплекта машин. Программа расчета выполнена на высокоуровневом языке программирования общего назначения Python.

Ключевые слова: сетевой граф, строительные машины, комплектование, приведенные затраты.

На сегодняшний день нефтяная отрасль бурно развивается, растут объемы добычи нефти, ведется разведка и разработка новых месторождений, поэтому возникает необходимость в строительстве резервуаров для хранения готовой продукции и сырья. В рыночной экономике строительные организации заинтересованы в повышении эффективности производства земляных работ и получении максимальной прибыли от используемой техники. В современных условиях затраты на механизацию и автоматизацию работ являются определяющим фактором в ценообразовании. Сложная структура парка строительных машин, способных выполнять определенное количество операций производственного цикла, приводит к тому, что для реализации всей совокупности работ по созданию сооружения необходимо сформировать комплект машин, способный выполнить весь объем работ [1].

Ввиду многообразия строительной техники, рациональный выбор комплекта машин, необходимых для разработки котлована под

РВС, следует проводить с помощью современных методик и технологий [2]. Для формирования оптимального комплекта машин принято пять операций, из них первые три операции могут быть выполнены тремя видами машин, а четвертая и пятая двумя видами, в таком случае число различных комплексов машин для выполнения заданного строительного процесса составит 108 вариантов [3]. Из-за большого числа различных вариантов выбор наиболее оптимального становится затруднительной задачей. Актуальность статьи заключается в оптимизации поиска решения задачи в условиях минимальных потерь при определенных исходных данных. Метод Дейкстры позволяет найти решения по оптимальному комплектованию машин [4]. Определяющим фактором при выборе комплекта машин являются приведенные затраты на кубометр произведенной продукции, которые были приняты для критерия оптимизации [5]. Комплексный подход и оптимальный выбор средств механизации на этапе земляных работ способствуют сокращению

продолжительности строительства, экономии трудовых затрат и придают строительному производству динамический характер.

Исходные данные для оптимального комплектования:

Добыча нефти близ села Романова, муниципального образования города Березники Пермского края. Превышения между высотами у устьев скважин при инженерно-геологических изысканиях – 0,35 м. Стальной вертикальный резервуар (РВС) расположен в лесном массиве. Овраги, холмы и возвышенности отсутствуют.

Устройство основания производится под вертикальный стальной резервуар для хранения нефтепродуктов объемом 5000 м³, диаметр резервуара 22,8 м, высота $h = 12,0$ м.

Глубина отрыва котлована 3,0 м.

Разрабатываемый грунт представлен следующими породами:

Первый слой по данным бурения – суглинок лессовидный, полутвердый, мощность составляет 3,45 м.

– модуль деформации $E = 12,0$ МПа (120,0 кгс/см²);

– удельное сцепление $c_n = 20$ кПа (0,2 кгс/см²);

– угол внутреннего трения $\varphi_n = 21^\circ$;

– плотность $\rho_s = 2,67$ т/м³, $\rho_d = 1,39$ т/м³, $\rho = 1,72$ т/м³;

– удельный вес $\gamma = 16,8$ Н/м³.

Второй слой представлен суглинком лессовидным, мягкопластичным. Мощность слоя 2 по данным составляет от 4,5 м.

– модуль деформации $E = 10,4$ МПа (104,0 кгс/см²);

– удельное сцепление $c_n = 32$ кПа (0,32 кгс/см²);

– угол внутреннего трения $\varphi_n = 31^\circ$;

– плотность $\rho_s = 2,66$ т/м³, $\rho_d = 1,46$ т/м³, $\rho = 1,9$ т/м³;

– удельный вес $\gamma = 18,5$ кН/м³.

Третий слой – песок мелкий, средней плотности, влажный. Мощность слоя составляет 3,75 м.

Согласно полевым, лабораторным исследованиям для ИГЭ – 3 представлены следующие характеристики:

– модуль деформации $E = 14,5$ МПа (145,0 кгс/см²);

– удельное сцепление $c_n = 5$ кПа (0,05 кгс/см²);

– угол внутреннего трения $\varphi_n = 31^\circ$;

– плотность $\rho_s = 2,65$ т/м³, $\rho_d = 1,55$ т/м³, $\rho = 1,86$ т/м³;

– удельный вес $\gamma = 18,6$ кН/м³.

Объемы работ представлены в табл. 1. На рис. 1 представлен план и разрез котлована под РВС.

При производстве работ выполняется технологический процесс, включающий следующие технологические операции:

1. Срез растительного слоя грунта, вертикальная планировка поверхности земли;

2. Разработка котлована одноковшовым экскаватором с погрузкой в автосамосвалы;

3. Вывоз грунта с территории строительной площадки с помощью автосамосвалов;

4. Обратная засыпка пазух фундамента фронтальным погрузчиком;

5. Послойная трамбовка обратной засыпки пазух фундамента.

В качестве критерия эффективности производства земляных работ используется величина удельных приведенных затрат, которая учитывает себестоимость работ и капитальных вложений. Технологический процесс, выполняемый за минимальные затраты, обеспечит формирование требуемого комплекта машин. При расчете приведенных затрат использовались такие показатели, как трудоемкость, норма времени, сменная выработка, стоимость, удельные капитальные вложения. В расчете применены индексы изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ на эксплуатацию машин и механизмов (Письму ФАУ ФССЦ по Пермскому краю № 01-04-16/ПФИ от 21.10.2016 «Об индексах изменения сметной стоимости СМР на III квартал 2019 г.»). Приведенные затраты сведены в табл. 2, 3.

На основании приведенных затрат (табл. 2, 3) построен сетевой граф возможных комплектов машин (рис. 2). При этом индексом I обозначен номер выполняемой операции, индексом J и K – машина, участвующая в выполнении той или иной операции [6].

Таблица 1

Ведомость объёмов работ

№	Наименование	Примечание	Ед. изм.	Кол.
1	Срез растительного слоя	Высота срезаемого слоя – 0,05 м. Диаметр котлована поверху – 13,9 м.	м ²	20,4
2	Разработка котлована	$V = (\pi \cdot ((D_1 + D_2) / 2)^2 / 4 \cdot H_p) \cdot k_{o.p.}$ ($k_{o.p.} = 1,2$)	м ³	1955,2
3	Вывоз грунта	-	м ³	1955,2
4	Обратная засыпка котлована	$V = (V_k + V_n + V_f) / k_{o.p.}$ ($k_{o.p.} = 1,03$)	м ³	1793,5
5	Уплотнение грунта обратной засыпки	-	м ³	1793,5

Рис. 1 План котлована

Таблица 2

Приведенные затраты на выполнение технологических операций тремя машинами

Наименование технологической операции	Приведенные затраты на 1 м ³ грунта, руб.		
1. Планировка территории бульдозером	Liebherr PR 724	Komatsu D6IPX-23	Кировец D65EX-15LGP
	36,57	23,72	18,78
2. Разработка грунта экскаватором с погрузкой в автосамосвал	Liebherr R317 Litronic	ЭО-3122	Hyundai R800LC-9
	376,37	346,65	333,03
3. Вывоз излишнего грунта автосамосвалами	МАЗ-4581Р2-420-020	FAW (CA3075P40K2YA81)	Foton BJ3125DEPEA-1
	1208,1	1499,47	1552,99

Таблица 3

Приведенные затраты на выполнение технологических операций двумя машинами

5. Обратная засыпка погрузчиком	АМКОДОР 332В	Bull SL 380
	416,82	377,78
6. Трамбовка обратной засыпки пазух фундамента	Ammann AVN 5020	DDE VP90-НК
	119,10	103,43

На графе над стрелкой указывается величина затрат на выполнение данной операции данной машиной, после выполнения предыдущей операции предыдущей машиной. Круг в начале стрелки обозначает машину, выпол-

няющую предыдущую операцию, а в конце стрелки – текущую. Начальный (0,1) и конечный (6,1) кружок сетевого графа представляют собой фиктивные машины: М (0,1) и М (6,1).

Рис. 2 Сетевой граф возможных комплексов машин с результатами расчёта по приведённым затратам

Таблица 4

Исходные данные для решения задачи методом Дейкстры

I – опе- ра- ция	Машины, выполняющие предыдущую операцию								
	J = 1			J = 2			J = 3		
	Машины, выполняющие текущую операцию								
	K = 1	K = 2	K = 3	K = 1	K = 2	K = 3	K = 1	K = 2	K = 3
	Затраты (приведенные с учетом индекса)								
1	36,57	23,72	18,78						
2	412,98	383,22	369,6	400,09	370,37	356,75	395,15	365,43	351,81
3	1584,47	1875,84	1929,36	1554,75	1846,12	1899,64	1541,13	1832,5	1886,02
4	1624,92	1585,88		1916,29	1877,25		1969,81	1930,77	
5	535,92	520,25		496,88	481,21				
6	0			0					

Для решения данной задачи используют метод Дейкстры, который позволяет заменить перебор всех вариантов, используя рекуррентное уравнение [7].

В методе Дейкстры функциональное уравнение записывается в следующем виде (1):

$$Y(I, K) = \min [Y(I - 1, J) + C(I, J, K)], \quad (1)$$

где $Y(I, K)$ – минимальные суммарные затраты, которые необходимы для части технологического процесса, состоящего из I -ого количества операций с начала процесса, I -я операция выполняется K -ой машиной;

$Y(I-1, J)$ – минимальные суммарные затраты, которые необходимы для части технологического процесса, состоящего $(I-1)$ – ого количества операций с начала процесса, $(I-1)$ – я операция выполняется J -ой машиной.

Алгоритм метода Дейкстры включает два этапа.

I. Для каждой машины необходимо определить минимальные суммарные затраты на каждой технологической операции от начала к концу.

Число сумм, из которых выбирается минимальная, равно числу стрелок, которые направлены в данный узел. При этом каждая сумма состоит из минимальных затрат в узле, из которого выходит стрелка, и затрат, необходимых на выполнение операции.

II. Определение оптимального комплекта машин, обеспечивающего минимальные затраты для всего технологического процесса.

Программа расчета выполнена на высокоуровневом языке программирования общего назначения Python. Необходимо с клавиатуры ввести количество операций, далее через пробел прописать все приведенные затраты на каждой технологической операции (табл. 4), следующим этапом программа посчитает суммарные приведенные затраты на разработку 1 м³ грунта для данного комплекса машин.

Программа расчета:

Result = []

def def_min(one):

return(min(one))

data = []

print('Введите количество операций:')

a = input()

for option in range(int(a)):

print («Введите через пробел значения операций №»+str(option + 1))

my_list = [float(el) for el in input().split()]

data.append(my_list)

for mass in range(int(a)):

min_def = def_min(data[mass])

result.append(min_def)

print(min_def)

print(result)

print(sum(result))

A = 3978,81 руб./м³

Рис. 3 Сетевой граф оптимального комплекса машин, обеспечивающего минимальные затраты для всех технологических операций

По результатам расчета получены минимальные затраты на производственный процесс и определен оптимальный комплект машин для разработки котлована под фундамент вертикального стального резервуара [8]. На рис. 3 стрелками показаны машины, обеспечивающие минимальные затраты.

В качестве критерия оптимальности были выбраны минимальные приведенные затраты на единицу строительной продукции, в данном случае – 1 м^3 разработанного грунта.

Окончательно в комплекс строительных машин для выполнения работ на этапе нулевого цикла вошли марки машин:

1. Бульдозер Кировец D65EX-15LGP для планировки грунта;
2. Экскаватор Hyundai R800LC-9 для разработки грунта и погрузки в автосамосвал MA3-4581P2-420-020;
3. Автосамосвал MA3-4581P2-420-020 для загрузки и транспортировки разработанного грунта;
4. Фронтальный погрузчик Bull SL 380 для обратной засыпки грунта;

5. Трамбовочная виброплита марки DDE VP90-НК для уплотнения грунта обратной засыпки пазух фундамента.

Суммарные приведенные затраты на разработку 1 м^3 грунта для данного комплекса машин составили 3978,81 руб./ м^3 .

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что модель дает рассчитывать величину удельных приведенных затрат при разных условиях производства земляных работ, а также использование методики расчета по оптимальному комплектованию упростит выбор рационального подбора машин [9]. При этом прибыль строительной организации будет увеличиваться, продолжительность строительства сократится, снизятся трудовые затраты, тем самым произойдет получение наибольшего эффекта от строительства. Использование машин многоцелевого назначения выгодно использовать для незначительных объемов работ, а определение применимости данных машин возможно установить методом сравнения вариантов в комплекте со специализированными машинами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ватин Н. И., Колосова Н. Б., Бердюгин И. А. Исследование методик оценки эффективности производства земляных работ // Интернет-журнал «Строительство уникальных зданий и сооружений». 2013. № 7. С. 64-70.
2. Вахрушев С. И., Треногин Е. О. Опыт оптимизации комплекта строительных машин методом Дейкстры на объекте строительства г. Перми // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2017. № 1. С. 381-387.

3. Абдразаков Ф. К., Горюнов Д. Г. Оптимальное распределение техники – основа стабильного развития производства // Механизация строительства. 2004. № 1. С. 8-10.
4. Седов В. Л., Перцев В. П., Кузнецов С. М. Обоснование применения машин и механизмов для строительства сооружений // Транспортное строительство. 2004. № 2. С. 12-14.
5. Соколов И. А. Обоснование эффективности использования многоцелевых строительных машин при производстве земляных работ // Вестник Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. 2015. № 11. С. 61-66.
6. Ямишанова А. А., Ефременко А. С. Совершенствование технологии производства земляных работ на основе оптимизации комплекта машин // Молодежный вестник ИрГТУ. 2018. № 3. С. 29-33.
7. Айдын Е. В., Кузнецов С. М., Холмеева Н. В. Оптимизация парков, комплектов и комплексов строительных машин с учетом надежности их работы. Научно-исследовательские публикации. 2014. № 3 (7). С. 11-16.
8. Синенко С. А., Явонов Д. А. Комплектование строительной техники для производства земляных работ // European research: innovation in science, education and technology. 2018. С. 37-40.
9. Кудрявцев Е. М. Оптимизация комплектов СДМ в условиях неопределенности // Механизация строительства. 2015. № 2 (848). С. 25-29.

OPTIMUM PACKAGING OF MACHINES WHILE DEVELOPING A CROWN UNDER A VERTICAL STEEL TANK FOR OIL STORAGE WITH A VOLUME OF 5000 M³

© A. S. Semin, S. I. Vakhrushev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

The construction of buildings and structures of the oil complex is a complex technological process, which includes the production of earthworks. Construction machinery for earthworks should comply with both the technical characteristics for the performance of tasks under certain external conditions and economic indicators. The article discusses the question of the optimal acquisition of construction vehicles during the development of a pit for a vertical steel tank (TVS). A program has been developed to search for the optimal set of machines, in conditions of complete certainty. The calculation is based on the Dijkstra dynamic programming method. As an optimization criterion, the reduced costs per unit of one cubic meter of construction products were selected. The calculation is presented for each stage of the work. Based on the calculation result, a network graph was constructed with the choice of the optimal set of machines. The calculation program is executed in a high-level general-purpose programming language Python.

Keywords: network graph, construction machines, acquisition, reduced costs

REFERENCES

1. Vatin, N. I., Kolosova, N. B. and Berdiugin, I. A. (2013) 'Issledovanie metodik otsenki effektivnosti proizvodstva zemlianykh rabot' [Study of methods for evaluating the effectiveness of excavation] *Internet-zhurnal «Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy»*. № 7. Pp. 64-70.
2. Vakhrushev, S. I. and Trenogin, E. O. (2017) Opyt optimizatsii komplekta stroitel'nykh mashin metodom Deykstry na ob'yekte stroitel'stva v g. Permi. [Experience in optimizing a set of construction vehicles using the Dijkstra method at a construction site in Perm]. *Modern technologies in construction. Theory and practice*. № 1. Pp. 381-387.
3. Abdrazakov, F. K. and Goriunov, D. G. (2004) 'Optimal'noe raspredelenie tekhniki – osnova stabil'nogo razvitiya proizvodstva' [The optimal distribution of machinery is the basis for stable production development]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. № 1. Pp. 8-10.
4. Sedov, V. L. (2004) 'Obosnovanie primeneniya mashin i mekhanizmov dlya stroitel'stva sooruzheniy' [Rationale for the use of machinery for the construction of buildings]. *Transportnoe stroitel'stvo*. № 2. Pp. 12-14.
5. Sokolov, I. A. (2015) 'Obosnovanie effektivnosti ispol'zovaniia mnogotselevykh stroitel'nykh mashin pri proizvodstve zemlianykh rabot' [Justification of the effectiveness of the use of multi-purpose construction machines in the excavation]. *Vestnik Pridneprovskoi gosudarstvennoi akademii stroitel'stva i arkhitektury*. № 11. Pp. 61-66.
6. Yamshanova, A. A. and Efremenko A. S. (2018) 'Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva zemlianykh rabot na osnove optimizatsii komplekta mashin' [Improving the technology of excavation based on the optimization of a set of machines] *Molodezhnyi vestnik IrGTU*. № 3. Pp. 29-33.
7. Aydin E. V., Kuznetsov S. M. and Kholomeeva N. V. (2014) 'Optimizatsiya parkov, komplektov i kompleksov stroitel'nykh mashin s uchetom nadezhnosti ikh raboty' [Optimization of parks, sets and complexes of construction vehicles, taking into account the reliability of their work]. *Research publications*. № 3 (7). Pp. 11-16.
8. Sinenko, S. A. and Javonov, D. A. (2018) Komplektovanie stroitel'noj tekhniki dlja proizvodstva zemljanykh rabot [Acquisition of construction equipment for earthworks] European research: innovation in science, education and technology. Pp. 37-40.
9. Kudrjavcev, E. M. (2015) 'Optimizatsiya komplektov SDM v usloviyakh neopredelennosti' [Optimization of SDM kits in the face of uncertainty] *Mehanizatsiya stroitel'stva*. № 2 (848). Pp. 25-29.