

УДК 69.003.123

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПЛЕКТА МАШИН

© А.А. Ямшанова<sup>1</sup>, А.С. Ефременко<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Цель данной статьи – совершенствование технологии производства земляных работ на основе оптимизации комплекта машин. В ходе работы применялись экспериментальные и теоретические методы исследования совершенствования технологий производства земляных работ на основе оптимизации комплекта машин. Была исследована эффективность применения оптимального комплекта машин в соответствии с технологическими и организационными условиями выполняемых земляных работ. Сделан вывод о том, что комплексная механизация земляных работ предусматривает сравнение экономических показателей вариантов комплектов машин и определения минимума приведенных затрат на выполнение работ.

*Ключевые слова:* устройство земляных сооружений, зимние условия, организационно-технологическая последовательность работ, комплексная механизация, принцип ведущего механизма.

### WORKING THE PROCESS OF EARTHWORKS THROUGH MACHINE SET OPTIMIZATION

© A.A. Yamshanova, A.S. Efremenko

Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov Str., Irkutsk 664074, Russian Federation

The purpose of this article is to improve the technology of excavation works on the basis of optimizing the set of machines. In the course of the work, experimental and theoretical methods were used to study the improvement of technologies for the production of excavation work on the basis of optimization of a set of machines. The efficiency of applying the optimal set of machines in accordance with the technological and organizational conditions of excavation work was studied. It is concluded that the comprehensive mechanization of excavation involves comparing the economic indicators of machine tool variants and determining the minimum of the resulted costs for the performance of work.

*Keywords:* earthwork structure, winter conditions, organizational and technological sequence of works, complex mechanization, principle of driving gear

#### Введение

Физико-механические характеристики грунтов естественного основания имеют прямое влияние на эффективность их обработки с использованием современных средств механизации строительного производства (машин для земляных работ) [1].

В зимних условиях, под влиянием отрицательных температур воздуха формируется процесс промерзания слоев грунтового основания, предназначенных для устройства в них земляных сооружений. Промерзание грунта начинается при минимальных отрицательных значениях температуры воздуха (начиная с  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и заключается в фазовом переходе влаги (содержащейся в порах грунта и выполняющей функции связующего материала) из жидкого в твердое состояние (лед). Образование льда провоцирует формирование новых контактных связей между минеральными частями грунта, которые отсутствуют в «непромерзлом» состоянии грунта.

Процесс промерзания водонасыщенных слоев грунтового основания, включающих глинистые частицы, сопровождается заметным приростом прочности. Прочность песчаных и гравелистых грунтов, находящихся в неводонасыщенном состоянии, практически не изменяется при их промерзании. Увеличение прочности грунта в зимний период (за счет формирования льда) приводит к заметному повышению трудоемкости его разработки (в том числе и с использованием средств механизации земляных работ) [2].

Наличие льда резко повышает способность грунта к абразивному истиранию рабочих (стальных) органов строительных машин и механизмов при производстве земляных работ. Интенсивность износа рабочих органов машин для земляных работ в мерзлых грунтах может превышать (в зависи-

<sup>1</sup> Ямшанова Анна Анатольевна, магистрант Института архитектуры, строительства и дизайна, e-mail: 2182@mail.ru

Anna A. Yamshanova, a postgraduate student of Architecture, Construction and Design Institute, e-mail: 2182@mail.ru

<sup>2</sup> Ефременко Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства Института архитектуры, строительства и дизайна, e-mail: ooosgs@mail.ru

Anton S. Efremenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Construction Industry Department of Architecture, Construction and Design Institute, e-mail: ooosgs@mail.ru

мости от вида машины, грунта и технологического процесса) аналогичный показатель для немерзлых грунтов в 50–700 раз [1].

### Организационно-технологическая последовательность производства земляных работ в зимних условиях

Нормы и правила производства работ по устройству земляных сооружений (ям, котлованов, траншей) в зимний период года (период времени года, характеризующийся устойчивыми отрицательными температурами воздуха и естественного (грунтового) основания) допускают применение комплексной механизации основных строительных процессов, связанных с обработкой слоев грунтового основания [1, 2].

Целесообразность производства земляных работ в особых условиях (низкой температуры воздуха и грунта в сочетании с особенностями инженерно-геологических и гидрогеологических условий строительной площадки), а также эффективность организационно-технологической последовательности строительства в значительной степени определяется следующими факторами:

- видом и объемами земляного сооружения;
- доступностью средств механизации (машин и механизмов) земляных работ;
- наличием необходимого качества транспортной инфраструктуры и материальных ресурсов.

Организационно-технологическая последовательность устройства земляных сооружений в зимних условиях допускает применение следующих основных методов (вариантов) проведения земляных работ [3, 4]:

● *вариант 1*: разработка немерзлого грунта в выемке с предварительной защитой от промерзания мест разработки:

- вспахивание с боронованием,
- глубокое рыхление,
- окучивание,
- утепление искусственными теплоизоляционными материалами,
- покрытие устойчивым слоем пены,
- искусственное засоление,
- снегозадержание,
- организация воздушной прослойки под слоем льда;

● *вариант 2*: разработка мерзлого грунта в выемке с его предварительным рыхлением:

- рыхление грунта ударной нагрузкой,
- рыхление грунта статическими рыхлителями,
- рыхление грунта взрывным способом,
- рыхление (разработка) грунта с предварительной нарезкой блоками;

● *вариант 3*: разработка мерзлого грунта в выемке без предварительных операций (защиты от промерзания и/или рыхления):

- с использованием приводных двигателей повышенной мощности землеройных машин,
- с использованием ковшов с пневмоударными зубьями,
- с использованием приводных двигателей повышенной мощности землеройных машин и ковшов с пневмоударными зубьями;

● *вариант 4*: предварительное оттаивание мерзлого грунта в выемке с последующей его разработкой в немерзлом (талом) состоянии:

- оттаивание с использованием пара,
- оттаивание с использованием горячей воды,
- оттаивание с использованием электрической энергии,
- оттаивание с использованием электрохимической энергии,
- оттаивание с использованием открытого огня.

Выбор рационального способа проведения земляных работ осуществляется на основе метода вариантного проектирования. Суть данного метода заключается в рассмотрении нескольких возможных вариантов производства земляных работ.

Решением поставленной задачи принято считать такой вариант производства земляных работ в зимний период, который обеспечивает наилучшие абсолютные технико-экономические показатели.

### Комплексная механизация производства земляных работ в зимних условиях

Комплексная механизация производства строительных работ и процессов является одним из наиболее значимых показателей качества и критерия выбора соответствующей организационно-технологической последовательности строительного производства [5].

Принцип формирования ведущего механизма (звена) предусматривается для обеспечения эффективности использования различных (по производительности и назначению) машин и механизмов в рамках сложного комплексного строительного процесса (устройства земляного сооружения в зимних условиях) [5]. В структуре комплекта машин и механизмов, звеньев и бригад, которые осуществляют выполнение земляных работ, выделяются ресурсы, занятые реализацией самого ответственного (ведущего) строительного процесса. Именно эти ресурсы рассматриваются в качестве основного инструмента (ведущего звена), который и обеспечивает качественное выполнение ведущего

процесса. Для этих ресурсов определяются нужные характеристики и формируются необходимые условия для их выполнения. Характеристики остальных ресурсов, которые заняты при реализации сложного комплексного строительного процесса, принимаются с учетом принятых параметров ресурсов ведущего звена.

**Экспериментальное исследование**

При формировании условий для определения оптимального варианта комплексной механизации земляных работ наиболее важным является выбор критерия оптимизации [6]. Критерий оптимизации комплекта машин характеризуется следующими основными особенностями:

- должен иметь количественное выражение при любой возможной комбинации исходных данных;
- должен быть простым, легко вычисляемым и иметь технико-экономический смысл для облегчения последующего анализа полученных результатов;
- должен характеризоваться чувствительностью к изменениям анализируемых (исходных) параметров.

Существуют две основные формы представления критерия оптимизации земляных работ [4].

Первая форма предусматривает достижение максимума, полезного эффекта (например, прибыли) при данных затратах ресурсов на устройство земляного сооружения или принцип максимизации эффекта (прибыли):

$$PV = V(C-З)+PP(T_H-T), \tag{1}$$

где  $PV$  – прибыль, дополненная эффектом от сокращения продолжительности устройства земляного сооружения;  $V$  – объем земляного сооружения (или земляных работ, необходимых для его устройства);  $C$  – стоимость единицы измерения объем земляного сооружения (или земляных работ, необходимых для его устройства);  $З$  – удельные приведенные затраты на единицу измерения объем земляного сооружения (или земляных работ, необходимых для его устройства);  $PP$  – среднегодовая прибыль за период сокращения продолжительности устройства земляного сооружения;  $T_H$  – нормативный срок устройства земляного сооружения;  $T$  – фактическая (запроектированная) продолжительность устройства земляного сооружения.

Вторая форма предусматривает минимизацию затрат ресурсов на устройство земляного сооружения с обязательным условием достижения заданного полезного эффекта или принцип минимизации затрат:

$$З = C+(PP(T_H-T)-PV)/V. \tag{2}$$

Оба рассмотренных принципа (принцип максимизации эффекта и принцип минимизации затрат) эквивалентны друг другу в том смысле, что для формализации оптимального решения возможно использовать любую из двух рассмотренных форм. Вместе с тем критерий эффективности в формате зависимости (2) позволяет предметно и эффективно решать проблему оптимального проектирования и формирования комплектов машин для различных типов земляных сооружений и технологий производства земляных работ. В соответствии с этим критерием производится выбор такого варианта комплексной механизации производства земляных работ в зимних условиях, для которого наибольшие затраты меньше, чем наибольшие затраты для любого другого варианта:

$$\min C \frac{\max}{i} = \min_i \max C_{ij}, \tag{3}$$

где  $C_{ij}$  – затраты при использовании совокупности параметров машин комплекта  $i$  и совокупности условий производства земляных работ  $j$ .

Критерий минимальных затрат в формате зависимости является наиболее осторожным, консервативным способом формализации выбора варианта комплексной механизации в зимних условиях, который учитывает наиболее неблагоприятные условия производства работ [3, 6].

В таблице приведены укрупненные статистические данные по показателям эффективности устройства земляных сооружений в зимних условиях с применением рассмотренных выше методов (вариантов) проведения земляных работ.

**Исходная информация по затратам на устройство земляных сооружений (по единице измерения) по вариантам производства земляных работ**

| Вариант производства земляных работ (комплект машин $K$ ) | Условия производства земляных работ   |       |       |       |
|---|---|-------|-------|-------|
|   | $У_1$   | $У_2$ | $У_3$ | $У_4$ |
|   | Затраты на проведение работ по $i$ -варианту земляных работ (с использованием $i$ -го комплекта машин) для $У_i$ -го условия производства работ, руб. |       |       |       |
| Вариант 1 (комплект $K_1$ )                               | 25,8  | 33,8  | 24,2  | 15,4  |
| Вариант 2 (комплект $K_2$ )                               | 39,6  | 30,7  | 26,6  | 6,8   |
| Вариант 3 (комплект $K_3$ )                               | 48,4  | 26,2  | 17,5  | 4,8   |
| Вариант 4 (комплект $K_4$ )                               | 17,6  | 19,4  | 28,8  | 40,3  |
| Удельный вес условий $У_i$                                | 0,20  | 0,20  | 0,30  | 0,30  |

В состав условий производства земляных работ включены:  $Y_1$  – сложность разработки земляного сооружения;  $Y_2$  – объем земляного сооружения;  $Y_3$  – продолжительность устройства земляного сооружения;  $Y_4$  – дополнительные энергетические ресурсы.

Затраты на эксплуатацию  $i$ -го комплекта машин для устройства земляного сооружения (в соответствии с принятым вариантом производства работ) определяются аналитической зависимостью вида

$$ЗЭ_i = \sum_{j=1}^m Z_{ij} Y_j. \quad (4)$$

Затраты на эксплуатацию  $i$ -го комплекта машин для устройства земляного сооружения составляют:

$$ЗЭ_1 = \sum_{j=1}^4 (25,8 \cdot 0,2 + 33,8 \cdot 0,2 + 24,2 \cdot 0,3 + 15,4 \cdot 0,3) = 23,81 \text{ руб.}$$

$$ЗЭ_2 = \sum_{j=1}^4 (39,6 \cdot 0,2 + 30,7 \cdot 0,2 + 26,6 \cdot 0,3 + 6,8 \cdot 0,3) = 24,08 \text{ руб.}$$

$$ЗЭ_3 = \sum_{j=1}^4 (48,4 \cdot 0,2 + 26,2 \cdot 0,2 + 17,5 \cdot 0,3 + 4,8 \cdot 0,3) = 21,61 \text{ руб.}$$

$$ЗЭ_4 = \sum_{j=1}^4 (17,6 \cdot 0,2 + 19,4 \cdot 0,2 + 28,8 \cdot 0,3 + 40,3 \cdot 0,3) = 28,13 \text{ руб.}$$

Произведенные расчеты по критерию эффективности (2) и (4) указывают на преимущества комплекта механизации земляных работ по варианту 3 (разработка мерзлого грунта в выемке без предварительных операций в виде защиты от промерзания и/или рыхления), затраты на эксплуатацию которого составляют 21,61 руб.

### Результаты и их обсуждение

Анализ четырех основных методов (вариантов) проведения земляных работ указывает на то обстоятельство, что организационно-технологическая последовательность строительства, связанная с предварительной защитой или рыхлением немерзлого грунта (варианты 1 и 2), включает определенный перерыв между комплексами работ (предварительного и основного периодов). При этом предполагается формирование двух технологически не связанных частных строительных потоков (и соответствующих комплектов машин и механизмов).

Аналогичным образом можно оценить возможности комплексной механизации земляных работ с применением организационно-технологической последовательности строительства, связанной с оттаиванием мерзлого грунта (вариант 4). Рассматриваемая технология строительства земляных сооружений не позволяет сформировать целостный строительный поток, поскольку ориентирована на использование возможности энергетических ресурсов, а не на производительность машин для земляных работ.

Комплексная механизация производства земляных работ в зимних условиях, сформированная с применением принципа ведущего механизма (звена), возможна при применении организационно-технологической последовательности, связанной с разработкой мерзлого грунта, без предварительных мероприятий (вариант 3).

В этом случае механизм, предназначенный для рыхления мерзлого грунта, вполне может быть принят в качестве ведущего механизма (звена) технологически целостного и связанного строительного потока [7].

Эффективность критерия (формы представления критерия) оптимизации земляных работ в значительной степени зависит от исходной информации о возможных условиях строительства. Для этого необходимо в каждом конкретном случае выявлять все существенные факторы, которые способны тем или иным образом влиять на критерий оптимизации.

Если какой-либо существенный фактор по тем или иным причинам окажется неучтенным, это очень сильно повлияет на конечный результат оптимизации и результаты формирования соответствующего комплекта машин.

При технической невозможности или экономической нецелесообразности учета полного состава факторов применяется методический подход, при котором к анализу допускается ограниченное число основных, определяющих факторов (условий) производства работ.

### Выводы

Таким образом, комплексная механизация земляных работ предусматривает сравнение экономических показателей вариантов комплектов машин и определение минимума приведенных затрат на выполнение работ.

### Библиографический список

1. Андросова И.А. Технология и механизация земляных работ в зимних условиях. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2004. 83 с.
2. Барышников А.А., Шадрин А.А. Земляные работы в зимних условиях // Региональное развитие: электронный научно-практический журнал. 2015. № 8 (12). С. 1–5.
3. Круглов А.И., Кузнецов С.М., Легостаева О.А. К вопросу автоматизации подбора экскаваторных комплектов для выполнения земляных работ // Механизация строительства. 2017. № 1 (871). С. 49–54.
4. Салаватов С.Ю. Характеристика мерзлых грунтов при инженерно-геологических изысканиях // Символ науки. 2017. № 1-2. С. 32–33.

5. Гриншпун Л.В., Карпов А.В., Чиненков М.С., Чумаганов А.П. Земляные работы: справочник строителя. М.: Стройиздат, 1992. 352 с.
6. СП 48.13330.2011. Организация строительства. М.: Минрегион России, 2011. 22 с.
7. Спектор М.Д. Выбор оптимальных вариантов организации и технологии строительства. М.: Стройиздат, 1980. 334 с.