

А.В. Полянский

2026

**Автоматизированное решение
организационно-технологических задач
железнодорожного строительства**

Часть 2

Учебное пособие для студентов специальности 23.05.06
«Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей»



УДК 625.1
ББК 39.20-06
П 545

Автор:

Полянский Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Проектирование и строительство железных дорог» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия.

Рецензент:

Гороховцев Борис Иванович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Проектирование и строительство железных дорог» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия.

Полянский, Алексей Викторович

П 545 Автоматизированное решение организационно-технологических задач железнодорожного строительства. Часть 2. Учебное пособие – М.: Мир науки, 2026 г. – Сетевое издание. Режим доступа: <https://izd-mn.com/PDF/15MNNPU26.pdf> – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-908127-14-1
DOI: 10.15862/15MNNPU26

В учебном пособии содержатся теоретические и практические материалы, необходимые для автоматизированного решения организационно-технологических задач железнодорожного строительства с применением системы *Mathcad*. Рассмотрены особенности решения задач технологии, организации и планирования железнодорожного строительства, в частности: влияния неблагоприятных природно-климатических явлений на производство работ, моделирования технологических процессов, планирования и распределения ресурсов строительного производства.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей», специализаций «Строительство магистральных железных дорог» и «Управление техническим состоянием железнодорожного пути». Пособие может быть использовано при изучении дисциплин: «Организация, планирование и мониторинг железнодорожного строительства», «Модели и методы инженерных расчетов», «Управление организационно-технологической надежностью строительства» а также может быть полезно аспирантам, научным работникам и специалистам проектных и строительных организаций.

Табл. 12, рис. 37, библиогр. 10 назв.

Издание распространяется под лицензией Creative Commons CC BY 4.0

ISBN 978-5-908127-14-1

© Полянский Алексей Викторович
© ООО Издательство «Мир науки», 2026 г.

Оглавление

Введение	4
1. Определение целодневных потерь рабочего времени зимой в железнодорожном строительстве из-за комплексного влияния неблагоприятного температурно-ветрового режима.....	5
1.1. Теоретические основы	5
1.2. Пример решения.....	7
2. Определение внутрисменных потерь рабочего времени зимой из-за неблагоприятных температурно-ветрового и светового режимов.....	12
2.1. Теоретические основы	12
2.2. Пример решения.....	13
3. Определение потерь рабочего времени в летний период из-за осадков и ветрового режима воздуха	19
3.1. Теоретические основы	19
3.2. Пример решения.....	20
4. Определение оптимального расхода ресурсов для возведения водопропускных труб на строящемся участке железной дороги	25
4.1. Теоретические основы	25
4.2. Пример решения.....	25
5. Оптимизация числа автомобильных смен для перевозки каменных материалов на участок строящейся железной дороги	29
5.1. Теоретические основы	29
5.2. Пример решения.....	30
6. Оптимальное распределение бригад по объектам железнодорожного строительства	33
6.1. Теоретические основы	33
6.2. Пример решения.....	36
7. Формирование оптимальных комплектов машин для реализации технологического процесса возведения объекта железнодорожного пути	43
7.1. Теоретические основы	43
7.2. Пример решения.....	47
8. Расчет организации работ по сооружению земляного полотна на термопросадочных вечномерзлых грунтах	52
8.1. Теоретические основы	52
8.2. Пример решения.....	62
Литература.....	68

Введение

Во второй части учебного пособия продолжено рассмотрение современных подходов к решению комплекса задач железнодорожного строительства в контексте автоматизированного принятия решений. Особое внимание уделено применению математических моделей и методов для решения организационно-технологических задач с учетом особенностей:

- влияния природно-климатических условий на ход работ;
- цифрового моделирования технологических циклов;
- планирование и распределение ресурсов для производства работ.

Автор стремился представить материал в максимально понятной форме, минимизируя сложные математические доказательства, при этом сохраняя строгость расчетов и точность результатов. Все теоретические положения сопровождаются практически применимыми примерами из области организационно-технологического проектирования железнодорожного строительства.

Современные стандарты для инженеров путей сообщения-строителей предполагают не только глубокое знание технических аспектов, но и навыки работы с современными программными платформами, направленными на автоматизацию принятия решений. В качестве основной инструментальной среды выбрана система для инженерных и технических вычислений *Mathcad* (РТС), которая обеспечивает:

- интуитивно понятный интерфейс с использованием стандартных математических символов;
- визуализацию расчетов в виде формул и графиков;
- возможность структурированного представления данных.

Mathcad автоматически проверяет совместимость единиц измерения в формулах, что помогает избежать ошибок при работе с физическими величинами. Это важнейшее преимущество для инженерных расчетов. *Mathcad* поддерживает как символьные вычисления (аналитические решения), так и численные методы, что позволяет решать широкий спектр задач: от вывода формул до моделирования сложных систем. Такие возможности делают *Mathcad* удобным для использования в решении организационно-технологических задач железнодорожного строительства, а также значительно снижают вероятность ошибок по сравнению с ручными расчетами или использованием электронных таблиц.

В учебном пособии документы с примерами решения задач, созданные в *Mathcad*, имеют унифицированный формат:

- блоки, выделенные желтым цветом, содержат исходные данные;
- блоки, выделенные голубым цветом (в рамке), содержат результаты расчетов с их интерпретацией.

Такой подход упрощает восприятие информации и позволяет оперативно адаптировать решения задач под новые условия.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 23.05.06 «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей».

1. Определение целодневных потерь рабочего времени зимой в железнодорожном строительстве из-за комплексного влияния неблагоприятного температурно-ветрового режима

1.1. Теоретические основы

Потери рабочего времени в зимний период года. При проектировании организации строительных работ зимой, особенно в суровых климатических районах, необходимо учитывать многочисленные простои людей и техники из-за недопустимого влияния низких температур и сильного ветра.

При работе людей на открытом воздухе объективная оценка режима труда имеет народнохозяйственное значение, так как работа при чрезмерно суровой погоде ведет к массовому обморожению и простудным заболеваниям, а недостаточно оправданное прекращение работ к снижению их объема и ухудшению экономических показателей [1, 10].

С целью гигиенической оценки низких температур и скорости движения воздуха целесообразно использовать для измерения ощущения холода коэффициент «жесткости погоды», который основан на учете совокупности температуры и скорости ветра [1, 10]. Он выражается формулой

$$C = T + 2V, \quad (1)$$

где: C – коэффициент «жесткости погоды», балл;

T – средняя отрицательная температура воздуха за рассматриваемый период, °С;

V – средняя скорость ветра за тот же период, м/с;

2 – коэффициент влияния скорости ветра более 5 м/с при отрицательной температуре на организм человека.

Погода, оцененная в 30 баллов «жесткости», ограничивает пребывание рабочих на воздухе, При $C \geq 25$ баллов рабочим каждый час предоставляется десятиминутный перерыв на обогрев. При $C \geq 40$ баллов все наружные работы прекращаются (рисунок 1).

Неблагоприятный температурно-ветровой режим оказывает влияние и на работу техники. Активированные простои возникают ввиду ограничений по техническим и эксплуатационным характеристикам. Так, например, на рисунке 2 приведены критические значения метеоявлений для строительных кранов разных марок. Для остальных строительных машин (экскаваторы, бульдозеры и т.д.) при определении перерывов в работе следует учитывать дни с температурой воздуха ниже -40°C и «жесткости» погоды более 40 баллов.

При исследовании потерь рабочего времени в зимний период использован общий метод моделирования случайных процессов, учитывали динамику изменения и вероятностной характер соответствующих метеорологических явлений во времени и рассматривающий их комплексное воздействие (рисунок 3). Таким образом, моделируемый случайный процесс, являющийся результатом наложения комплекса случайных неблагоприятных погодных процессов, позволяет определить продолжительность экстремальных периодов, а также анализировать эти периоды [1, 10].

Сложность использования разработанной модели на практике с привлечением многочисленных срочных метеонаблюдений потребовала создания на базе модели методики перехода от срочных метеонаблюдений к среднемесячным значениям того или иного погодного фактора, приведенным в справочниках по климату.



Рисунок 1 - Режим работы на открытом воздухе



Рисунок 2 - Границы рабочего режима кранов в зависимости от жесткости погоды:

- 1 – для башенных кранов в обычном исполнении;
- 2 – для кранов марок УСБК-3, УСБК-5, УСБК-10;
- 3 – для марок БКСМ-4-5А, С-140, автокранов и путеукладчиков

Определение целодневных потерь рабочего времени зимой из-за комплексного влияния неблагоприятного температурно-ветрового режима. В решении задачи используются следующие исходные данные: среднемесячные значения температуры воздуха θ_{CM} , скорости ветра V_{CM} – средние за каждый месяц зимнего периода, для каждого пункта, находящегося на железнодорожной линии или вблизи нее. Продолжительность зимнего периода может быть определена по [1, 10].

Последовательность расчета предполагает:

1. Определение среднемесячного балла жесткости C_{CM} для каждого месяца зимнего периода:

$$C_{CM} = \theta_{CM} + 2V_{CM}, \quad (2)$$

2. Определение доли целодневных потерь рабочего времени по каждому зимнему месяцу по формуле:

$$\delta_{цп} = 0,0013C_{CM}^2 - 0,074C_{CM} + 1,15, \quad C_{CM} \in [25;50]. \quad (3)$$

1. Определение числа целодневных потерь по каждому месяцу зимнего периода:

$$n_{цп}(i) = 30,5\delta_{цп}(i). \quad (4)$$

2. Определение числа целодневных потерь за зимний период

$$N_{цп} = \sum_{i=1}^6 n_{цп}(i). \quad (5)$$

1.2. Пример решения

На рисунках 4-6 представлено решение задачи определения потерь рабочего времени зимой из-за комплексного влияния неблагоприятного температурно-ветрового режима.

Решение данной задачи демонстрирует возможности системы компьютерной математики *Mathcad*. Вначале следует внести данные в блок «Исходные данные» документа *Mathcad*.

Следует отметить, что получение результатов решения осуществляется в автоматизированном режиме, сразу после корректировки числовых параметров, помеченных желтым цветом. При этом корректировка числовых параметров должна осуществляться строго после оператора присваивания (:=).

В «Блоке решения» осуществляется расчет параметров в символьном виде с использованием стандартных операторов. Расчет каждого показателя сопровождается соответствующим пояснением. По формулам, размещенным в «Блоке решения», в автоматизированном режиме производится расчет и его результаты отражаются в блоке «Результаты решения».



Рисунок 3 - Моделирование потерь рабочего времени в течении суток путем наложения (метеоявлений) случайных процессов (зимний период)

Особенностью решения этой и последующих задач является то, что изменение численных значений приводит к автоматическому пересчету всех зависимых от этого значения параметров. Фактически реализуется возможность свойственная расчетам в электронных таблицах. Эта особенность, несомненно, способствует оперативному решению задачи с учетом внесения изменений в блоке «Исходные данные» или подбору/перебору различных коэффициентов.

Исходные данные и результаты расчета представлены в таблице 1.

В результате расчета для г. Салехард целодневные потери рабочего времени зимой составят $N_{цп} = 13$ суток.

Для решения этой задачи в блоке решения использованы элементы программирования в *Mathcad* для определения доли целодневных потерь рабочего времени по каждому зимнему месяцу $\delta_{цп}$ с учетом среднемесячного балла жесткости $C_{см}$.

Таблица 1 - Расчет числа целодневных потерь рабочего времени за зимний период для г. Салехард

Показатели	Месяцы					
	I	II	III	IV	XI	XII
θ_{CM}	-23,7	-22,3	-18,5	-9,7	-15,3	-21,8
V_{CM}	4,7	4,3	4,9	4,9	4,8	4,1
C_{CM}	33,1	30,9	28,3	19,5	24,9	30,0
$\delta_{ЦП}$	0,125	0,105	0,197	0	0	0,100
$n_{ЦП}$	4	3	3	0	0	3

Результаты вычисления численных значений трех показателей C_{CM} , $\delta_{ЦП}$, $n_{ЦП}$ представлены в векторной форме.

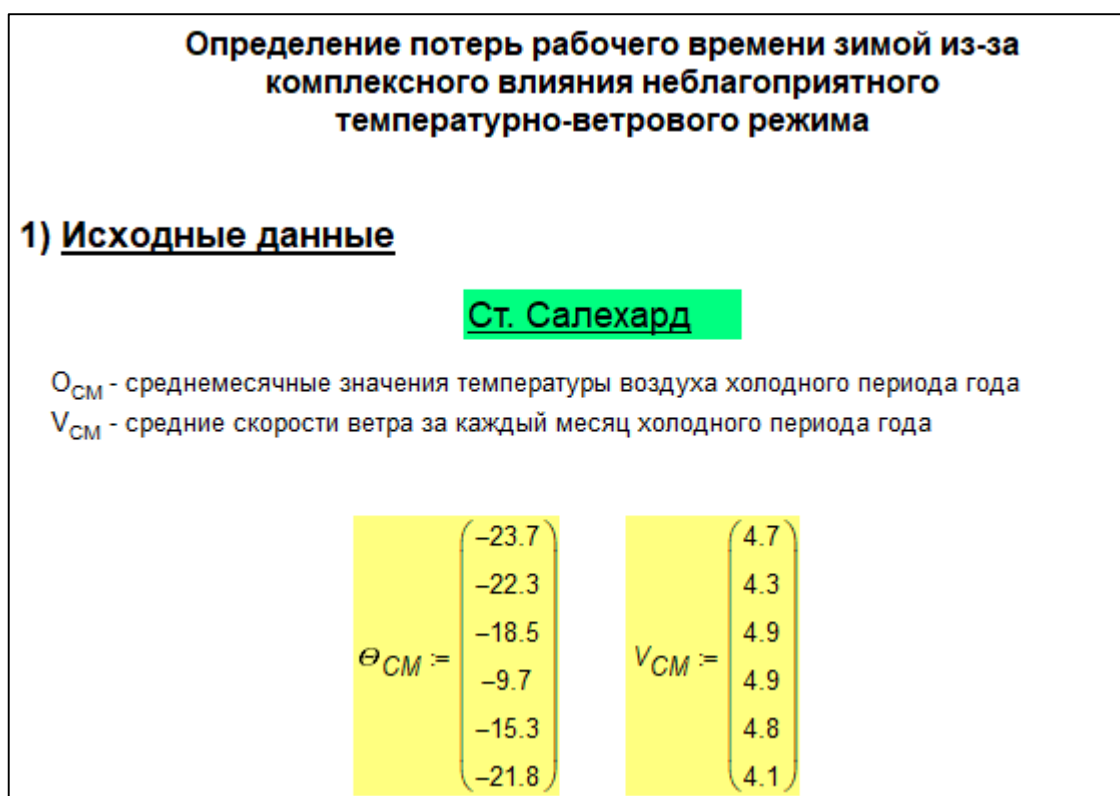


Рисунок 4 - Документ *Mathcad* с решением задачи определения целодневных потерь рабочего времени зимой из-за комплексного влияния неблагоприятного температурно-ветрового и светового режимов. Блок «Исходные данные»

2) Блок решения

$$\text{ORIGIN} := 1 \quad n := \text{rows}(\theta_{CM}) \quad i := 0..n$$

$$\theta_{CM} := -\theta_{CM}$$

Определение среднемесячного балла жесткости для каждого месяца зимнего периода

$$C_{CM} := \theta_{CM} + 2V_{CM}$$

Определение доли целодневных потерь рабочего времени по каждому зимнему месяцу

$$\delta_{ЦП} := \left| \begin{array}{l} n \leftarrow \text{rows}(C_{CM}) \\ \text{for } i \in 1..n \\ \quad \left| \begin{array}{l} b_i \leftarrow 0.0013(C_{CM_i})^2 - 0.074 C_{CM_i} + 1.15 \text{ if } C_{CM_i} \geq 25 \wedge C_{CM_i} \leq 50 \\ b_i \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ b \end{array} \right.$$

Определение числа целодневных потерь по каждому месяцу зимнего периода

$$n_{ЦП} := 30.5\delta_{ЦП}$$

Определение числа целодневных потерь за зимний период

$$N_{ЦП} := \sum_{i=1}^n n_{ЦП_i}$$

Рисунок 5 - Документ *Mathcad* с решением задачи определения целодневных потерь рабочего времени зимой из-за комплексного влияния неблагоприятного температурно-ветрового и светового режимов. Блок «Блок решения»

3) Результаты решения

Среднемесячный балл жесткости для каждого месяца зимнего периода

$$C_{CM} = \begin{pmatrix} 33.1 \\ 30.9 \\ 28.3 \\ 19.5 \\ 24.9 \\ 30.0 \end{pmatrix}$$

Доля целодневных потерь рабочего времени по каждому зимнему месяцу

$$\delta_{ЦП} = \begin{pmatrix} 0.125 \\ 0.105 \\ 0.097 \\ 0.000 \\ 0.000 \\ 0.100 \end{pmatrix}$$

Число целодневных потерь по каждому месяцу зимнего периода

$$n_{ЦП} = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \\ 3 \\ 0 \\ 0 \\ 3 \end{pmatrix} \text{ сутки}$$

Число целодневных потерь за зимний период

$$N_{ЦП} = 13 \text{ суток}$$

Рисунок 6 - Документ *Mathcad* с решением задачи определения целодневных потерь рабочего времени зимой из-за комплексного влияния неблагоприятного температурно-ветрового и светового режимов. Блок «Результаты решения»

2. Определение внутрисменных потерь рабочего времени зимой из-за неблагоприятных температурно-ветрового и светового режимов

2.1. Теоретические основы

Для решения задачи необходимо воспользоваться среднемесячными значениями балла «жесткости погоды» для каждого зимнего месяца, определенными в п. 2.1 [4].

Известен также коэффициент сменности, ($K_{CM} = 1$ или $K_{CM} = 2$) при принятом режиме работы машин и людей.

Внутрисменные потери включают в себя кратковременные потери, вследствие воздействия комплекса агрессивных погодных факторов: потери рабочего времени на обогрев рабочих при определенной жесткости погоды, в результате значительного сокращения светового дня, а также потери по организационным причинам. Таким образом:

$$K_{BC} = K_{IC} \cdot K_{CB} \cdot K_{ОРГ}, \quad (6)$$

где: K_{IC} – коэффициент использования смены, вследствие потерь на обогрев рабочих;

K_{CB} – коэффициент потерь в результате сокращения светового дня;

$K_{ОРГ}$ – коэффициент внутрисменных потерь по организационным причинам.

1. K_{IC} показывает какая доля смены может быть использована для работы, не считая потерь из-за воздействия неблагоприятной «жесткости погоды». K_{IC} определяется по следующим зависимостям с учетом принятого K_{CM} [1, 10].

При $K_{CM} = 1$:

$$K_{IC} = -0,00132 C_{CM}^2 + 0,0852 C_{CM} - 0,392 ; C_{CM} \in [25;50]. \quad (7)$$

При $K_{CM} = 2$:

$$K_{IC} = -0,00068 C_{CM}^2 + 0,027 C_{CM} + 0,738 ; C_{CM} \in [25;50]. \quad (8)$$

При односменной гибкой организации труда, когда возможно передвигать рабочую смену на более благоприятное время суток K_{IC} несколько выше, чем при двухсменной, когда рабочие смены точно привязаны к определенным часам суток.

2. Определение K_{CB} в результате сокращения светового дня. Фактор полярной ночи снижает производительность труда в среднем до 3% год из-за недостаточной освещенности строительной площадки и воздействия отрицательных психофизиологических факторов.

По данным Б.И. Березовского потери рабочего времени севернее полярного круга в результате сокращения светового дня составляют (таблица 2) [10]:

Таблица 2 - Потери рабочего времени севернее полярного круга в результате сокращения светового дня

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Потери рабочего времени, %	7	5	3	2	1	-	-	-	-	3	5	8

K_{CB} определяется как средний за зимние месяцы.

3. Определение $K_{ОРГ}$.

Как правило, к внутрисменным потерям по организационным причинам относятся нерегламентируемые перерывы, возникающие из-за плохой организации труда и производства, а также потери рабочего времени вследствие нарушения трудовой дисциплины и случайные простои по причинам, не зависящим от рабочих и инженерно-технического персонала.

С помощью методов математической статистики найдено приблизительное значение $K_{ОРГ} = 0,86$ с $\sigma = 0,03$ для Северных районов страны.

4. Расчет K_{BC} :

$$K_{BC} = K_{ИС} \cdot K_{CB} \cdot K_{ОРГ} \quad (9)$$

2.2. Пример решения

На рисунках 7-9 представлено решение задачи определения внутрисменных потерь рабочего времени зимой из-за неблагоприятных температурно-ветрового и светового режимов в автоматизированном режиме с применением системы *Mathcad*.

Пример расчета среднего за зимний период K_{BC} для г. Салехарда приведен в таблице 3.

Таблица 3 - Определение внутрисменных потерь рабочего времени зимой

Показатели	Месяцы						среднее за зиму
	I	II	III	IV	XI	XII	
C_{CM}	33,1	30,9	28,3	19,5	24,9	30,0	-
$K_{ИС} (K_{CM} = 1)$	0,98	0,99	1,0	1,0	1,0	1,0	0,99
$K_{ИС} (K_{CM} = 2)$	0,89	0,93	0,96	0,99	0,99	0,94	0,95
K_{CB}	0,93	0,95	0,97	0,98	0,95	0,92	0,95
$K_{ОРГ}$	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
$K_{BC} (K_{CM} = 1)$	0,64	0,66	0,72	0,74	0,70	0,64	0,68
$K_{BC} (K_{CM} = 2)$	0,58	0,62	0,69	0,73	0,70	0,60	0,65

Таким образом, K_{BC} - средний за зимний период, принимается равным 0,68 при $K_{CM} = 1$, и $K_{BC} = 0,65$ при $K_{CM} = 2$ для условий г. Салехарда.

Для решения этой задачи в блоке решения также как и в задаче в п. 1 использованы элементы программирования в *Mathcad* для определения коэффициентов использования смены, вследствие потерь на обогрев рабочих при $K_{CM} = 1$ и $K_{CM} = 2$.

Для определения средних значений коэффициентов использована функция *mean*, позволяющая определить среднее арифметическое.

Результаты решения для ряда коэффициентов представлены в векторной форме.

Определение внутрисменных потерь рабочего времени зимой из-за неблагоприятных температурно-ветрового и светового режимов

1) Исходные данные

Ст. Салехард

θ_{CM} - среднемесячные значения температуры воздуха холодного периода года
 V_{CM} - средние скорости ветра за каждый месяц холодного периода года
 n_{CB} - потери рабочего времени севернее полярного круга в результате сокращения светового дня
 $K_{ОРГ}$ - коэффициент внутрисменных потерь по организационным причинам

$\theta_{CM} :=$	$\begin{pmatrix} -23.7 \\ -22.3 \\ -18.5 \\ -9.7 \\ -15.3 \\ -21.8 \end{pmatrix}$	$V_{CM} :=$	$\begin{pmatrix} 4.7 \\ 4.3 \\ 4.9 \\ 4.9 \\ 4.8 \\ 4.1 \end{pmatrix}$	$n_{CB} :=$	$\begin{pmatrix} 7 \\ 5 \\ 3 \\ 2 \\ 5 \\ 8 \end{pmatrix}$	$K_{ОРГ} := 0.86$
------------------	---	-------------	--	-------------	--	-------------------

Рисунок 7 - Документ *Mathcad* с решением задачи определения внутрисменных потерь рабочего времени зимой из-за неблагоприятного температурно-ветрового и светового режимов. Блок «Исходные данные»

2) Блок решения

$$\text{ORIGIN} := 1 \quad n := \text{rows}(\Theta_{CM}) \quad i := 0..n$$

$$\Theta_{CM} := -\Theta_{CM}$$

Определение среднемесячного балла жесткости для каждого месяца зимнего периода

$$C_{CM} := \Theta_{CM} + 2V_{CM}$$

Определение коэффициентов использования смены, вследствие потерь на обогрев рабочих

При $K_{CM}=1$:

$$K_{ИС_1} := \begin{cases} n \leftarrow \text{rows}(C_{CM}) \\ \text{for } i \in 1..n \\ \quad \left| \begin{array}{l} b_i \leftarrow -0.00132(C_{CM_i})^2 + 0.0852 C_{CM_i} - 0.392 \text{ if } C_{CM_i} \geq 25 \wedge C_{CM_i} \leq 50 \\ b_i \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ b \end{cases}$$

При $K_{CM}=2$:

$$K_{ИС_2} := \begin{cases} n \leftarrow \text{rows}(C_{CM}) \\ \text{for } i \in 1..n \\ \quad \left| \begin{array}{l} b_i \leftarrow -0.00068(C_{CM_i})^2 + 0.027 C_{CM_i} + 0.738 \text{ if } C_{CM_i} \geq 25 \wedge C_{CM_i} \leq 50 \\ b_i \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ b \end{cases}$$

Рисунок 8 - Документ *Mathcad* с решением задачи определения внутрисменных потерь рабочего времени зимой из-за неблагоприятного температурно-ветрового и светового режимов. Блок «Блок решения» (начало)

Определение средних значений коэффициентов использования смены, вследствие потерь на обогрев рабочих

$$срK_{ИС_1} := mean(K_{ИС_1})$$

$$срK_{ИС_2} := mean(K_{ИС_2})$$

Определение коэффициента потерь в результате сокращения светового дня

$$K_{СВ} := 1 - 0.01n_{СВ}$$

Определение среднего значения коэффициента потерь в результате сокращения светового дня

$$срK_{СВ} := mean(K_{СВ})$$

Определение внутрисменных потерь рабочего времени зимой из-за неблагоприятных температурно-ветрового и светового режимов

$$K_{ВС_1} := \overrightarrow{(K_{ИС_1} \cdot K_{СВ})} \cdot K_{ОРГ}$$

$$K_{ВС_2} := \overrightarrow{(K_{ИС_2} \cdot K_{СВ})} \cdot K_{ОРГ}$$

Определение среднего значения внутрисменных потерь рабочего времени зимой из-за неблагоприятных температурно-ветрового и светового режимов

$$срK_{ВС_1} := mean(K_{ВС_1})$$

$$срK_{ВС_2} := mean(K_{ВС_2})$$

Рисунок 8 - Документ *Mathcad* с решением задачи определения внутрисменных потерь рабочего времени зимой из-за неблагоприятного температурно-ветрового и светового режимов. Блок «Блок решения» (*окончание*)

3) Результаты решения

Среднемесячный балл жесткости для каждого месяца зимнего периода

$$C_{CM} = \begin{pmatrix} 33.1 \\ 30.9 \\ 28.3 \\ 19.5 \\ 24.9 \\ 30 \end{pmatrix}$$

Коэффициенты использования смены, вследствие потерь на обогрев рабочих

При $K_{CM}=1$:

$$K_{ИС_1} = \begin{pmatrix} 0.98 \\ 0.98 \\ 0.96 \\ 0 \\ 0 \\ 0.98 \end{pmatrix}$$

При $K_{CM}=2$:

$$K_{ИС_2} = \begin{pmatrix} 0.89 \\ 0.92 \\ 0.96 \\ 0 \\ 0 \\ 0.94 \end{pmatrix}$$

Средние значения коэффициентов использования смены, вследствие потерь на обогрев рабочих

$$срK_{ИС_1} = 0.65$$
$$срK_{ИС_2} = 0.617$$

Рисунок 9 - Документ *Mathcad* с решением задачи определения внутрисменных потерь рабочего времени зимой из-за неблагоприятного температурно-ветрового и светового режимов. Блок «Результаты решения» (начало)



Рисунок 9 - Документ *Mathcad* с решением задачи определения внутрисменных потерь рабочего времени зимой из-за неблагоприятного температурно-ветрового и светового режимов. Блок «Результаты решения» (окончание)

3. Определение потерь рабочего времени в летний период из-за осадков и ветрового режима воздуха

3.1. Теоретические основы

Определение потерь времени в зимний период вследствие снежных отложений.

подавляющее большинство строительных работ ведется с использованием автомобилей, работа которых зимой затруднена вследствие выпадения снежных осадков. Скорость автомобилей по мере накопления снега при метелях и снегопадах значительно снижается, а потом движение становится невозможным, по данным исследований М. Г. Лазебникова проезд автомобилей очень затруднен, если толщина слоя снега на покрытии станет равной высоте дорожного просвета, так как трение заднего моста о снег и волочение массы снега под автомобилем препятствует его движению. Максимальный просвет у автомобиля ограниченной проходимости в нашей стране составляет 220-300 мм для грузовых автомобилей [1, 10].

При выпадении обильного снегопада, езда грузовых автомобилей невозможно, затруднены также условия производства работ на открытой площадке. Необходимы меры и время на снегоочистку строительной площадки и подъездных дорог после снегопада или метели.

На основании СП 131.13330.2025 [9] проведена статистическая обработка данных по вероятностям и длительностям выпадения твердых осадков с высотой снежного покрова 30 см. По результатам анализа обработанных данных получены изолинии среднего количества часов критических снежных отложений, приведенные на рисунке 10. На основе обобщения опыта эксплуатации строительных машин на снегоуборке, величина потерь рабочего времени на очистку площадок от снега может быть принята равной 20% от количества часов снежных отложений, определенных по изолиниям на рисунке 12.

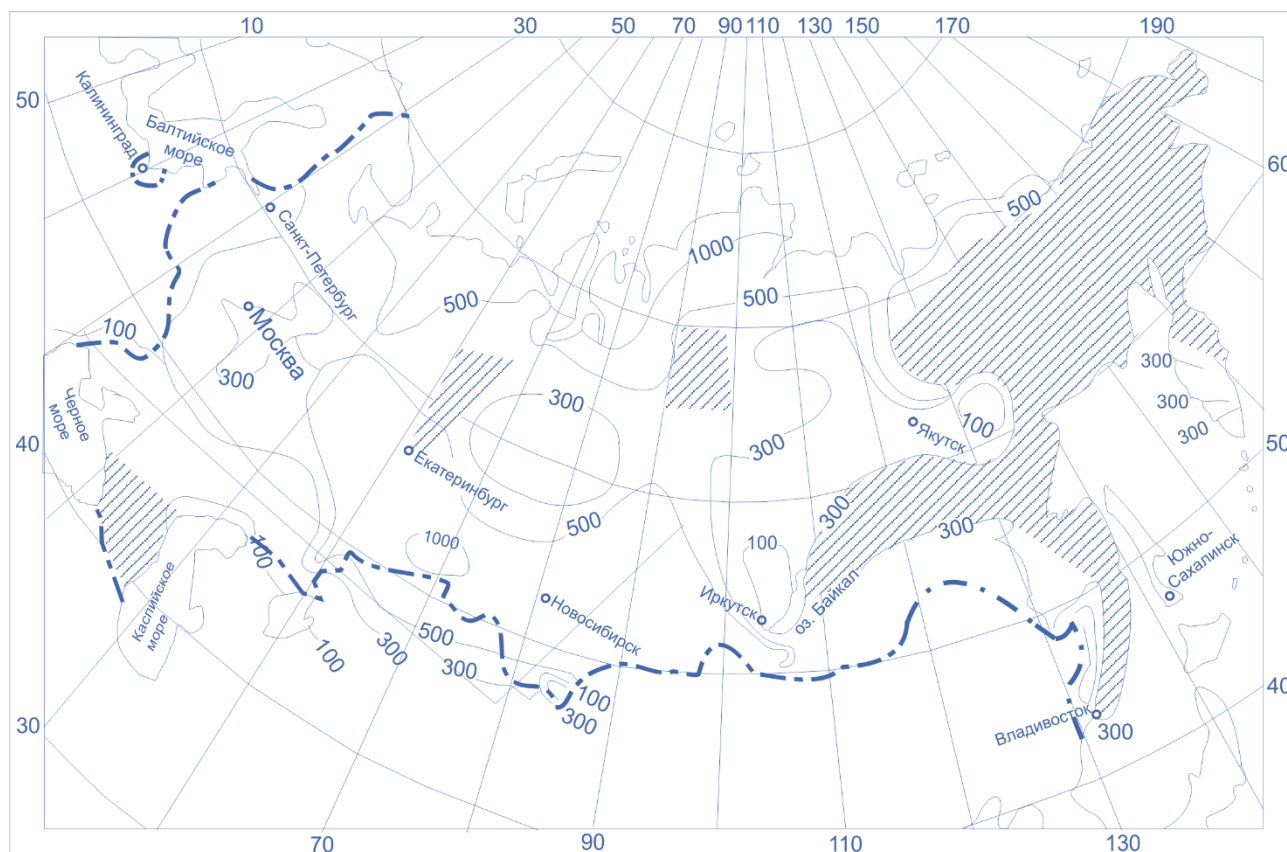


Рисунок 10 – Картограмма максимальной за зиму продолжительности (в часах) переноса снега при общих и низовых метелях

Определение потерь рабочего времени в летний период из-за неблагоприятных дождевых осадков и ветрового режима воздуха. При производстве всех видов работ, интенсивные дождевые осадки (свыше 10 мм/сут) летом приводят по тем или иным причинам к остановке производства работ. Так, при производстве механизированных земляных работ требуется, чтобы грунты легко разрабатывались, не прилипали к рабочим органам землеройных машин; при проезде машин грунты не должны образовывать значительной колеи, а при укладке в насыпь они должны уплотняться до требуемой плотности.

Земляные работы наиболее эффективно выполнять при влажности грунтов, близкой к оптимальной. Повышение влажности грунтов, вызываемое летними дождями, должно быть рассмотрено с двух сторон: с одной стороны, влияние дождей на грунт, как материал для возведения земляного полотна; с другой, влияние дождей на грунтовке дороги, по которым подвозятся строительные материалы, конструкции и грунты. Не всякий дождь вызывает переувлажнение грунтов. Количество осадков, вызывающих переувлажнение грунтов зависит от ряда природных факторов: типа грунта, продолжительности и интенсивности дождя, ветрового режима, рельефа, растительности и др.

Моделируемый случайный процесс изменения влажности грунта, являющийся результатом наложения комплекса случайных неблагоприятных метеоявлений, позволяет определить продолжительность экстремальных периодов. Представлен на рисунке 11. Сложность использования разработанной модели [1] на практике с привлечением многочисленных срочных метеонаблюдений потребовала создания на базе модели методики перехода от срочных наблюдений к среднемесячным значениям критических осадков и расчета потерь рабочего времени летом. По данным исследований ряда авторов [1, 10] к критическим дождевым осадкам летом могут быть отнесены для несвязных грунтов дожди более 10 мм/сут, для связных грунтов дожди более 5 мм/сут.

Исходные данные: продолжительность летнего периода; число дней с критическими осадками в месяцы летнего периода и средняя продолжительность осадков (справочник по климату СССР, соответствующий выпуск); тип грунта – суглинок.

3.2. Пример решения

Пример расчета приведен в таблице 4 для станции Яр-Сале Ханты-Мансийского АО.

Таблица 4 - Расчет продолжительности осадков

Месяцы летнего периода	Число дней с осадками 5 мм/сут	Средняя продолжительность осадков, час	Чистое время осадков 5 мм/сут, n_{oc}		Потери рабочего времени, смен	
			часов	смен	По месяцам лета	За летний период, всего
V	1,2	10,1	12,12	1,51	5,07	13,21
VI	3,0	7,4	22,20	2,78	2,96	
VII	3,1	6,9	21,39	2,67	2,69	
VIII	0,3	6,5	1,95	0,24	0,10	
IX	3,1	9,4	29,14	3,64	2,39	

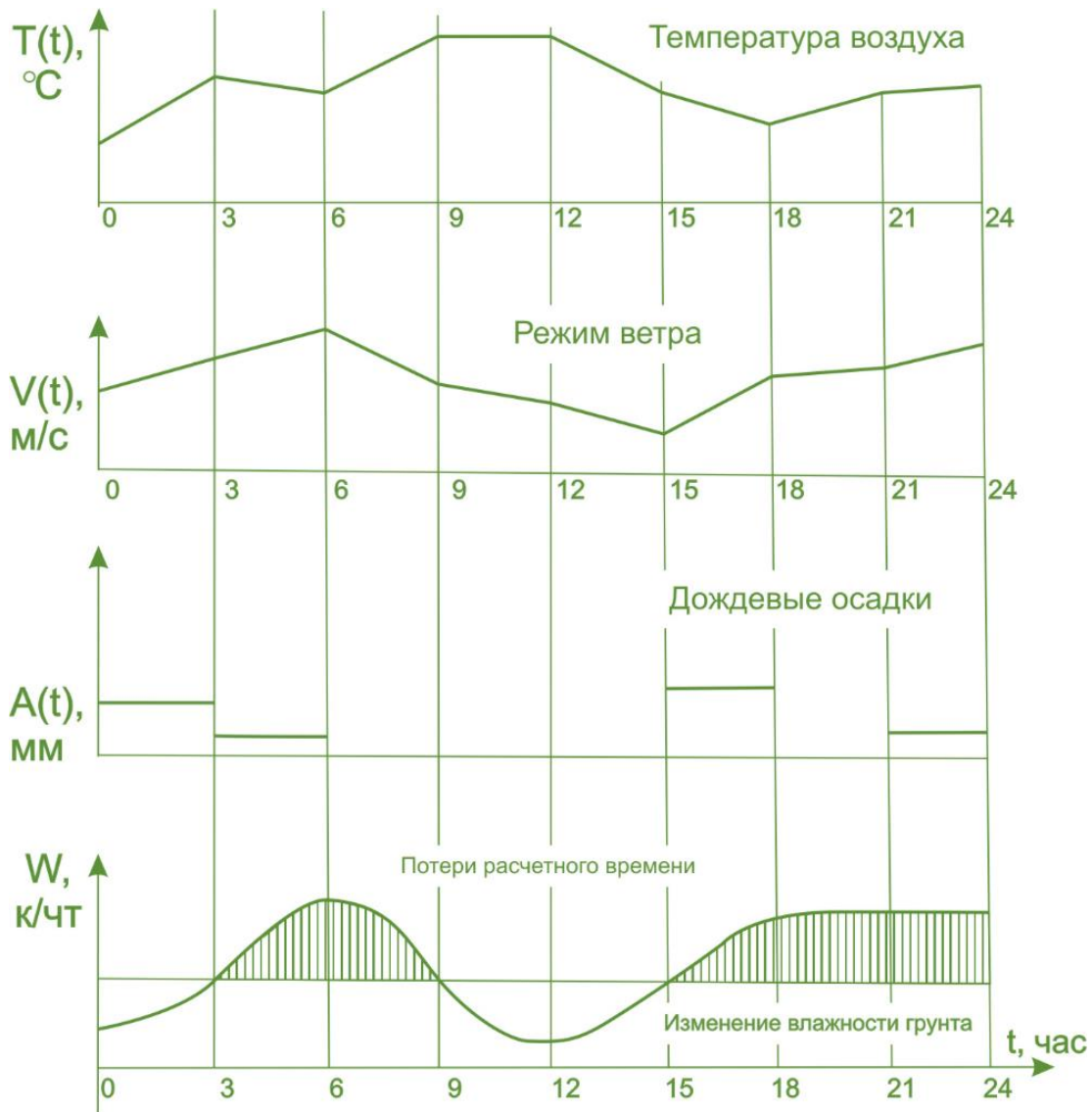


Рисунок 11 - Моделирование потерь рабочего времени в течение суток путем наложения (метеоявлений) случайных процессов (летний период)

Для вычисления целодневных потерь времени в каждом месяце летнего периода, используем уравнения регрессии [1, 10]:

$$\text{май - } \bar{n}_{\text{цп}} = -0,1n_{\text{ос}}^2 + 3,5n_{\text{ос}}; \quad (10)$$

$$\text{июнь - } \bar{n}_{\text{цп}} = 0,06n_{\text{ос}}^2 + 0,9n_{\text{ос}}; \quad (11)$$

$$\text{июль - } \bar{n}_{\text{цп}} = 0,04n_{\text{ос}}^2 + 0,9n_{\text{ос}}; \quad (12)$$

$$\text{август - } \bar{n}_{\text{цп}} = 0,08n_{\text{ос}}^2 + 0,4n_{\text{ос}}; \quad (13)$$

$$\text{сентябрь - } \bar{n}_{\text{цп}} = 0,07n_{\text{ос}}^2 + 0,4n_{\text{ос}}. \quad (14)$$

Таким образом, для ст. Яр-Сале характерны потери рабочего времени для суглинистых грунтов вследствие переувлажнения и дальнейшего просыхания до оптимальной влажности в количестве $\bar{n}_{\text{цп}} = 10,91$ смен для всего летнего периода.

Как отмечалось выше (рисунок 2) в летний период могут наблюдаться потери рабочего времени из-за неблагоприятного ветрового режима для обеспечения безопасности работы таких машин, как монтажные краны, путеукладчики и т.п.

На рисунках 12-14 представлено автоматизированное решение задачи определения потерь рабочего времени в летний период из-за неблагоприятных дождевых осадков и ветрового режима воздуха с применением системы *Mathcad*. В блоке решения показан прием последовательного перемножения элементов компонент векторов N_{OC} и T_{OC} для определения значений чистого времени осадков 5 мм/сут по месяцам (n'_{OC}). Для этого использована функция векторизации, расположенная в палитре Матрица.

Определение потерь рабочего времени в летний период из-за неблагоприятных дождевых осадков и ветрового режима воздуха

1) Исходные данные

Ст. Яр-Сале

N_{OC} - число дней с осадками, 5 мм/сут
 T_{OC} - средняя продолжительность осадков, час

$N_{OC} = \begin{pmatrix} 1.2 \\ 3.0 \\ 3.1 \\ 0.3 \\ 3.1 \end{pmatrix}$

$T_{OC} = \begin{pmatrix} 10.1 \\ 7.4 \\ 6.9 \\ 6.5 \\ 9.4 \end{pmatrix}$

Рисунок 12 - Документ *Mathcad* с решением задачи определения потерь рабочего времени в летний период из-за неблагоприятных дождевых осадков и ветрового режима воздуха. Блок «Исходные данные»

2) Блок решения

$ORIGIN := 1$

Определение чистого времени осадков 5 мм/сут, (час)

$$n'_{OC} := \overrightarrow{(N_{OC} \cdot T_{OC})}$$

Определение чистого времени осадков 5 мм/сут, (смена)

$$n_{OC} := \frac{n'_{OC}}{8}$$

Определение целодневных потерь времени в каждом месяце летнего периода, (смена)

$$\text{май} \quad n_{ЦП_1} := -0.1 \cdot (n_{OC_1})^2 + 3.5 \cdot n_{OC_1}$$

$$\text{июнь} \quad n_{ЦП_2} := 0.06 \cdot (n_{OC_2})^2 + 0.9 \cdot n_{OC_2}$$

$$\text{июль} \quad n_{ЦП_3} := 0.04 \cdot (n_{OC_3})^2 + 0.9 \cdot n_{OC_3}$$

$$\text{август} \quad n_{ЦП_4} := 0.08 \cdot (n_{OC_4})^2 + 0.4 \cdot n_{OC_4}$$

$$\text{сентябрь} \quad n_{ЦП_5} := 0.07 \cdot (n_{OC_5})^2 + 0.4 \cdot n_{OC_5}$$

Рисунок 13 - Документ *Mathcad* с решением задачи определения потерь рабочего времени в летний период из-за неблагоприятных дождевых осадков и ветрового режима воздуха. Блок «Блок решения»

Результаты определения некоторых показателей представлены в векторной форме.

3) Результаты решения

Чистое время осадков 5 мм/сут

$$n'_{OC} = \begin{pmatrix} 12.12 \\ 22.20 \\ 21.39 \\ 1.95 \\ 29.14 \end{pmatrix} \text{ час}$$

Чистое время осадков 5 мм/сут

$$n_{OC} = \begin{pmatrix} 1.51 \\ 2.78 \\ 2.67 \\ 0.24 \\ 3.64 \end{pmatrix} \text{ смена}$$

Целодневные потери времени в каждом месяце летнего периода

$$n_{ЦП} = \begin{pmatrix} 5.07 \\ 2.96 \\ 2.69 \\ 0.10 \\ 2.39 \end{pmatrix}$$

Целодневные потери времени для всего летнего периода

$$\sum n_{ЦП} = 13.21 \text{ смен}$$

Рисунок 14 - Документ *Mathcad* с решением задачи определения потерь рабочего времени в летний период из-за неблагоприятных дождевых осадков и ветрового режима воздуха. Блок «Результаты решения»

4. Определение оптимального расхода ресурсов для возведения водопропускных труб на строящемся участке железной дороги

4.1. Теоретические основы

На строящемся участке железной дороги необходимо возвести водопропускные трубы из материалов двух типов: железобетонные и металлические. Необходимо выбрать оптимальное количество водопропускных труб каждого типа, обеспечивающее минимизацию трудозатрат, при соблюдении ограничений на доступные ресурсы (материалы, трудовые ресурсы, бюджет). То есть следует установить вид материалов и их количество, которые необходимы для производства конструктивных элементов труб, исключив при этом их избыток или недостаток, с учетом минимальных затрат.

Для решения поставленной задачи можно воспользоваться одним из методов линейного программирования – симплекс-методом. В строительстве симплекс-метод используется для решения задач, связанных с распределением материалов (цемент, металл, крепеж) и временных ресурсов (машинопарк, трудовые бригады). Применение метода позволяет не только оценить его эффективность при планировании количества материалов (ресурсов), но и проанализировать его роль в минимизации операционных издержек, а также предотвратить дисбаланс между потребностями и запасами [5-8].

Симплекс-метод, позволяет формализовать задачи оптимизации в виде системы линейных уравнений и неравенств, что особенно актуально для сложных производственных циклов, таких как строительство. Его применение основано на поиске экстремума целевой функции (например, затрат) при соблюдении ограничений:

- *целевая функция:*

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \rightarrow \max/\min, \quad (15)$$

где: c_i — коэффициенты прибыли или затрат, x_i — объемы ресурсов.

- *ограничения:*

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \end{cases}, \quad (16)$$

где: a_{ij} — коэффициенты потребления ресурсов, b_i — доступные запасы.

Применение симплекс-метода в железнодорожном строительстве обеспечивает:

- учет множества переменных (стоимость материалов, сроки поставок, технологические нормы);
- снижение риска экономических потерь из-за неоптимальных решений;
- возможность адаптации под динамические изменения производственной ситуации.

4.2. Пример решения

С целью определения оптимального расхода ресурсов для возведения водопропускных труб (диаметром 1,5 м и длиной (в среднем) – 20 м) двух типов на строящемся участке железной дороги предусмотрены исходные данные, представленные в таблице 5.

Таблица 5 – Потребность в ресурсах и их наличие

Наименование ресурсов	Количество (V_i)	Потребность на 1 трубу	
		железобетонная (B_i)	металлическая (M_i)
Материалы:			
сталь, т	30	1,5	4,3
бетон, м ³	200	35	-
гидроизоляция, кг	4600	650	400
уплотнит. прокладки, м	400	50	40
Трудозатраты, чел. - дн.	35	4,8	3,1

Основные параметры задачи:

- доступные ресурсы: V_1, V_2, \dots, V_n (сталь, бетон, гидроизоляция, уплотнители);
- нормы потребления ресурсов на одну водопропускную трубу:
 - в железобетонном исполнении: B_1, B_2, \dots, B_n ;
 - в металлическом исполнении: M_1, M_2, \dots, M_n ;
- трудозатраты:
 - общие: T ;
 - на возведение одной водопропускной трубы в железобетонном исполнении: Tb ;
 - на возведение одной водопропускной трубы в металлическом исполнении: Tm .

Целевая функция (максимизация количества водопропускных труб):

$$Z = x_1 + x_2 \rightarrow \max, \quad (17)$$

где: x_1 — количество водопропускных труб в железобетонном исполнении,
 x_2 — количество водопропускных труб в металлическом исполнении.

Ограничения:

$$\begin{cases} B_1x_1 + M_1x_2 \leq V_1 \\ B_2x_1 + M_2x_2 \leq V_2 \\ \dots \\ B_nx_1 + M_nx_2 \leq V_n \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

В соответствии с исходными данными:

$$\begin{cases} 1,5x_1 + 4,3x_2 \leq 30 & (\text{сталь}) \\ 35x_1 \leq 200 & (\text{бетон}) \\ 650x_1 + 400x_2 \leq 4600 & (\text{гидроизоляция}) \\ 50x_1 + 40x_2 \leq 400 & (\text{уплотнительные прокладки}) \\ 70x_1 + 50x_2 \leq 35 & (\text{трудозатраты}) \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \end{cases} \quad (19)$$

Математическая постановка соответствует решению задачи линейного программирования, условия оптимизации описываются системами линейных уравнений и неравенств. Решение задачи можно осуществить с применением системы *Mathcad*, используя

универсальную встроенную функцию **Minimize**. Документ, решающий данную задачу, представлен на рисунках 15 – 17.

Определение оптимального расхода ресурсов для возведения водопропускных труб на строящемся участке железной дороги

1) Исходные данные:

V - вектор, содержащий значения количества доступных ресурсов (сталь, т; бетон, м³; гидроизоляция, кг; уплотнительные прокладки, м);
 B - вектор, содержащий значения потребностей ресурсов на одну железобетонную водопропускную трубу;
 M - вектор, содержащий значения потребностей ресурсов на одну металлическую водопропускную трубу;
 T - общие трудозатраты, (чел. - дн.);
 Tb - трудозатраты на возведение одной водопропускной трубы в железобетонном исполнении (чел. - дн.);
 Tm - трудозатраты на возведение одной водопропускной трубы в металлическом исполнении (чел. - дн.).

$$V := \begin{pmatrix} 30 \\ 200 \\ 4600 \\ 400 \end{pmatrix}$$

$$B := \begin{pmatrix} 1.5 \\ 35 \\ 650 \\ 50 \end{pmatrix}$$

$$M := \begin{pmatrix} 4.3 \\ 0 \\ 400 \\ 40 \end{pmatrix}$$

$$Tb := 4.8$$

$$Tm := 3.1$$

$$T := 35$$

Рисунок 15 – Документ *Mathcad* с определением оптимального расхода ресурсов для возведения водопропускных труб на строящемся участке железной дороги. Блок «Исходные данные»

2) Блок решения

ORIGIN := 1

$f(x) := -x_1 - x_2$ - целевая функция

$n := \text{rows}(V)$ $i := 1..n$ $j := 1..2$ $x_j := 1$

Given

$Bx_1 + Mx_2 \leq V$ - ограничения

$Tb x_1 + Tm x_2 \leq T$

$x \geq 0$

R := Minimize(f, x)

Рисунок 16 – Документ *Mathcad* с определением оптимального расхода ресурсов для возведения водопропускных труб на строящемся участке железной дороги. Блок «Блок решения»

3) Результаты решения

$$R = \begin{pmatrix} 3 \\ 6 \end{pmatrix}$$

- количество водопропускных труб в железобетонном/металлическом исполнении

$$-f(R) = 9$$

- общее количество водопропускных труб

$$B \cdot R_1 + M \cdot R_2 = \begin{pmatrix} 30 \\ 117 \\ 4503 \\ 400 \end{pmatrix}$$

- количество использованных ресурсов

Рисунок 17 – Документ *Mathcad* с определением оптимального расхода ресурсов для возведения водопропускных труб на строящемся участке железной дороги. Блок «Результаты решения»

В итоге получаются следующие результаты:

$$x_1 = 3, x_2 = 6, Z = 9.$$

Анализ использования ресурсов (таблица 6):

- *лимитирующие ресурсы*: сталь и уплотнительные прокладки полностью исчерпаны.
- *избыточные ресурсы*:
 - бетон: 83 м³;
 - гидроизоляция: 97 кг.

Таблица 6 – Использование наличных ресурсов

Наименование ресурсов	Количество ресурсов		
	<i>в наличии</i>	<i>использованных</i>	<i>неиспользованных</i>
Материалы:			
сталь, т	30	30	0
бетон, м ³	200	117	83
гидроизоляция, кг	4600	4503	97
уплотнит. прокладки, м	400	400	0
Трудозатраты, чел. - дн.	35	35	–

5. Оптимизация числа автомобильных смен для перевозки каменных материалов на участок строящейся железной дороги

5.1. Теоретические основы

Особую роль в железнодорожном строительстве играет транспортировка строительных материалов. Даже при наличии достаточных запасов в карьерах неоптимальная организация перевозок может привести к неоправданным затратам машинного времени, простоям техники и срыву графика работ.

В железнодорожном строительстве наиболее распространённым частным случаем задачи линейного программирования является *транспортная задача* — распределение однородного груза от нескольких источников (поставщиков) к нескольким потребителям таким образом, чтобы минимизировать суммарные транспортные издержки при полном удовлетворении спроса и соблюдении ограничений по запасам. В предыдущей задаче (п. 4.1, (15), (16)) были рассмотрены общие условия для решения задач линейного программирования, которые применяются, в том числе, и к транспортным задачам. В отличие от классической транспортной задачи, где критерием оптимальности выступают денежные затраты, в условиях строительства железных дорог часто приходится минимизировать *временные ресурсы* — количество машино-смен автотранспорта или экскаваторов. Это обусловлено жёсткими сроками строительства и высокой стоимостью простоя техники. При этом возникают дополнительные ограничения, связанные с производительностью погрузочного оборудования, что превращает задачу в обобщённую модель линейного программирования с несколькими типами ресурсных ограничений [5-8].

Далее будет рассмотрена задача оптимизации автомобильных перевозок каменных материалов на участок строящейся железной дороги с учётом лимита экскаваторных смен.

Пусть на участок строящейся железной дороги необходимо вывезти 31000 м^3 каменных материалов. В районе строительства есть три карьера с запасами 10000 м^3 , 12000 м^3 , 16000 м^3 . Для погрузки материалов используются экскаваторы, имеющие производительность 250 м^3 в смену на карьерах №1 и №2 и 500 м^3 в смену в карьере №3. На погрузку материалов для рассматриваемого участка для экскаваторов выделен общий лимит 120 смен. Для перевозки 10000 м^3 материалов с карьера №1 требуется 1000 смен автомобилей, из карьера №2 - 1350, из карьера №3 - 1700 смен автомобилей. Найти оптимальный план перевозок, обеспечивающий минимальное количество автомобильных смен для перевозки каменных материалов на участок строящейся железной дороги.

Для решения поставленной задачи необходимо разработать модель, описывающую количество автомобильных смен при перевозке каменных материалов из карьеров на строящийся участок железной дороги и позволяющую оптимизировать число автомобильных перевозок. Тогда исходными данными к задаче будут следующие параметры:

- каменный материал во всех карьерах однородный;
- количество каменного материала в каждом i -ом карьере;
- потребность участка строящейся железной дороги;
- стоимость перевозки груза с i -го склада j -му потребителю.

Также будут применяться следующие допущения:

- пропускная способность дорог от каждого карьера не ограничена;
- общее количество каменных материалов в карьерах всегда больше или равно потребности участка строящейся железной дороги.

Введем обозначения:

- n – количество карьеров;
- V – потребность в каменных материалах для строящейся железной дороги;
- A_i – количество автомобильных смен, необходимых для перевозки 10000 м^3 каменных материалов с i -го карьера;

- B_j – запасы каменных материалов в каждом i -ом карьере в m^3 ;
- Ls – общий лимит смен для экскаваторов для участка на погрузку каменных материалов;
- x_i – объем каменных материалов, перевозимых от i -го карьера на участок строящейся железной дороги.

Требуется обеспечить минимальное количество автомобильных смен на перевозку каменных материалов из карьеров на участок строящейся железной дороги. Общее количество автомобильных смен равно:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{10000} \cdot x_i, \quad (20)$$

где: $f(x)$ – минимизируемая функция, зависящая от n переменных x_i .

Очевидно, что при этом должны выполняться ограничения:

- $\sum_{i=1}^n x_i = V$ – необходимо обеспечить потребности участка строящейся железной дороги каменными материалами в полном объеме;
- $\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{P_i} \leq ls$ – необходимо учесть производительность экскаваторов в смену в каждом i -ом карьере;
- $x_i \leq B_i$ – объем перевозимых каменных материалов не может быть запасы каждого i -го карьера;
- $x_i \geq 0$ – объем перевозимых каменных материалов не может быть отрицательным.

5.2. Пример решения

Математическая постановка соответствует решению задачи линейного программирования, условия оптимизации описываются системами линейных уравнений и неравенств. Решение задачи можно осуществить с применением системы *Mathcad*, используя универсальную встроенную функцию **Minimize**. Документ, решающий данную задачу, представлен на рисунках 18 – 20.

Оптимизация плана перевозок, обеспечивающего минимальное количество автомобильных смен для перевозки каменных материалов из карьеров на участок строящейся железной дороги

1) Исходные данные:

A - вектор, содержащий значения количества смен, необходимых для перевозки 10000 м³ каменных материалов с карьеров;
 B - вектор, содержащий значения запасов каменных материалов в карьерах в м³;
 P - вектор, содержащий значения сменных производительностей экскаваторов по карьерам в м³;
 Is - общий лимит смен для экскаваторов для участка на погрузку материалов;
 V - потребность в каменных материалах для строящейся железной дороги.

$$A := \begin{pmatrix} 1000 \\ 1350 \\ 1700 \end{pmatrix}$$

$$B := \begin{pmatrix} 8000 \\ 9000 \\ 10000 \end{pmatrix}$$

$$P := \begin{pmatrix} 250 \\ 250 \\ 500 \end{pmatrix}$$

$$Is := 60$$

$$V := 20000$$

Рисунок 18 – Документ *Mathcad* с решением задачи на минимизацию количества автомобильных смен для перевозки каменных материалов на участок строящейся железной дороги. Блок «Исходные данные»

2) Блок решения

ORIGIN := 1

$f(x) := A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_3$ - целевая функция

$n := \text{rows}(A) \quad i := 1..n \quad x_i := 1$

Given

$x_1 + x_2 + x_3 = \frac{V}{10000}$ - потребность в материалах

$\frac{10000}{P_1} x_1 + \frac{10000}{P_2} x_2 + \frac{10000}{P_3} x_3 \leq Is$ - ограничение по сменам экскаваторов

$0 \leq x_1 \leq \frac{B_1}{10000} \quad 0 \leq x_2 \leq \frac{B_2}{10000} \quad 0 \leq x_3 \leq \frac{B_3}{10000}$ - запасы материалов в карьерах

R := Minimize(f, x)

Рисунок 19 – Документ *Mathcad* с решением задачи на минимизацию количества автомобильных смен для перевозки каменных материалов на участок строящейся железной дороги. Блок «Блок решения»

3) Результаты решения

$$R = \begin{pmatrix} 10000 \\ 12000 \\ 9000 \end{pmatrix}$$

- количество вывозимых каменных материалов с карьеров в м³

$$f(R) = 4150$$

- число автомобильных смен

Рисунок 20 – Документ *Mathcad* с решением задачи на минимизацию количества автомобильных смен для перевозки каменных материалов на участок строящейся железной дороги. Блок «Результаты решения»

6. Оптимальное распределение бригад по объектам железнодорожного строительства

6.1. Теоретические основы

В рамках планирования железнодорожного строительства возникает необходимость эффективного распределения ограниченного числа рабочих между несколькими объектами, чтобы максимизировать объем выполненных строительно-монтажных работ (СМР). Для решения задач такого рода используется метод динамического программирования, позволяющий разбить многопараметрическую задачу на последовательность этапов с упрощенной структурой.

Динамическое программирование, разработанное и развитое математиком Р. Беллманом, представляет собой метод, применимый к широкому классу задач оптимизации, включая распределение ресурсов, управление запасами, задачи замены оборудования или загрузки систем. Его уникальность заключается в подходе, основанном на поэтапном решении многошаговых процессов, где на каждом этапе оптимизируется только одно управляющее действие, но с учетом всех последствий в будущем. Идея метода строится на декомпозиции сложной задачи большой размерности на последовательность подзадач меньшей размерности, связанных рекуррентными процедурами, что позволяет достичь оптимального решения всей задачи в целом.

Центральным в теории динамического программирования является «принцип оптимальности», согласно которому оптимальное управление на каждом шаге должно обеспечивать максимальный суммарный выигрыш – текущий результат плюс оптимальный результат всех последующих шагов. Это требует учета состояния системы S перед каждым шагом и выбора управления x_i , которое максимизирует совокупный эффект.

Для поиска оптимальной стратегии принятия последовательных решений чаще всего используется метод, при котором сначала выбирается финальное решение, а затем, двигаясь в обратном временном направлении, определяются все предыдущие шаги до исходного. Чтобы реализовать этот подход, необходимо проанализировать все возможные ситуации, в которых принимается последнее решение. Условия, характеризующие систему на каждом этапе, называются её «состоянием». Под термином «состояние системы» понимается описание её текущего положения, позволяющее прогнозировать поведение при учете будущих решений. При этом не требуется учитывать предысторию состояния или ранее принятые действия, что позволяет последовательно оптимизировать каждое решение по отдельности. Независимо от способа поиска — табличного или аналитического — преимущество метода заключается в пошаговой оптимизации, где выбор каждого решения отделяется во времени. Однако применим он не ко всем процессам: обязательным условием является «аддитивность» цен всех решений и независимость будущих результатов от предшествующих состояний системы. При большом количестве решений можно использовать относительные оценки состояний, где разница между оценками соседних шагов остается постоянной, отражая средний «доход» на одно решение. Также допускается «дисконтирование доходов» от отдаленных решений, особенно если они принимаются редко (например, раз в год). Это позволяет избежать последовательного перебора всех шагов и перейти к прямому использованию функционального уравнения, что значительно сокращает объем вычислений [4].

Алгоритм построения и решения задач динамического программирования. Основные принципы формализации задач динамического программирования строятся на последовательном разложении многокритериальной оптимизации на локальные этапы, что позволяет устранить комбинаторный взрыв и обеспечить вычислительную эффективность. Для построения математической модели необходимо соблюдать следующие этапы:

1. *Идентификация фазовых координат.* Определить набор параметров (фазовые координаты) S , описывающих состояние управляемой системы в начале каждого этапа. Эти

координаты должны полностью характеризовать систему для принятия решения на последующих шагах без учета предшествующей истории.

2. *Этапное разбиение операции.* Разбить процесс на последовательность m этапов (шагов), где каждый этап соответствует принятию оптимального управления с учетом текущего состояния системы.

3. *Определение допустимых управлений.* Для каждого этапа i указать множество допустимых управлений x_i , а также ограничения, налагаемые на них. Это включает технические, ресурсные или временные ограничения.

4. *Формализация локального выигрыша.* Ввести функцию

$$W_i(S) = f_i(S, x_i), \quad (21)$$

которая оценивает прирост оптимального критерия на этапе i при выборе управления x_i из состояния S .

5. *Трансформация состояния системы.* Описать динамику перехода между состояниями через оператор

$$S' = \varphi_i(S, x_i), \quad (22)$$

где: S' – новое состояние системы после применения управления x_i на этапе i .

6. *Рекуррентное соотношение оптимального выигрыша.* Сформулировать основное уравнение динамического программирования:

$$W_i(S) = \max_{x_i \in X_m(S)} \{f_i(S, x_i) + W_{i+1}(\varphi_i(S, x_i))\}. \quad (23)$$

Здесь $W_i(S)$ – условный оптимальный выигрыш, начиная с этапа i и до конца операции. Максимизация производится по всем допустимым $x_i(S)$, при этом в функцию $W_{i+1}(S)$ подставляется измененное состояние S' .

7. *Базовый случай (последний этап).* Для финального этапа m определить $W_m(S)$ как максимальный локальный выигрыш:

$$W_m(S) = \max_{x_m \in X_m(S)} \{f_m(S, x_m)\}. \quad (24)$$

Это требует анализа всех состояний S , достижимых за один шаг до завершения процесса.

8. *Рекуррентная обратная итерация.* Начиная с этапа $m-1$, по формуле (23) вычислить $W_i(S)$ для всех предшествующих этапов, сохраняя оптимальное управление $x_i(S)$, обеспечивающее максимум. Этот процесс продолжается до первого этапа, где определяется итоговый оптимальный выигрыш

$$W^* = W_1(S_0) \quad (25)$$

при известном начальном состоянии S_0 .

9. *Ретроспективная оптимизация.* Составить оптимальную траекторию решений:

- выбрать $x_1^* = x_1(S_0)$ для первого этапа;
- обновить состояние $S_1 = \varphi_1(S_0, x_1^*)$;
- продолжить выбор $x_{i+1}^*(S_i)$ на каждом последующем этапе до завершения операции.

Расширение на мультипликативные критерии. Метод применим и к задачам, где общий выигрыш задается произведением локальных:

$$W = \prod_{i=1}^m w_i. \quad (26)$$

В этом случае рекуррентное уравнение (23) модифицируется заменой операции сложения на умножение:

$$W_i(S) = \max_{x_i \in X_m(S)} \{f_i(S, x_i) \cdot W_{i+1}(\phi_i(S, x_i))\}. \quad (27)$$

Здесь $f_i(S, x_i)$ должно быть положительным для избежания нулевых значений.

При реализации этапов следует учитывать, что:

- фазовые координаты должны быть минимальными и независимыми, чтобы избежать избыточности;
- для сложных систем требуется оптимизация вычислительной сложности, например, через кэширование промежуточных результатов (метод «памяти»);
- устойчивость решения к ошибкам в начальных условиях зависит от структуры переходов $\phi_i(S, x_i)$.

Данный подход обеспечивает системный анализ оптимальных стратегий в условиях последовательных решений, оставаясь фундаментальным для задач управления, экономики и инженерии.

Несмотря на то, что термин «динамическое программирование» связан с задачами, учитывающими временные промежутки, метод успешно применяется и в статических задачах, где время не играет роли. Более точным названием, отражающим суть подхода, могло бы быть «многоэтапное программирование», подчеркивающее пошаговый характер вычислений. Этот метод особенно ценен в условиях множества переменных и ограничений в виде неравенств, где классические методы математической оптимизации оказываются неэффективными.

Примеры задач динамического программирования. В задачах, связанных с динамическим программированием, ключевым является разбиение проблемы на этапы и последовательное определение оптимальных решений на каждом из них. Рассмотрим три классические задачи, демонстрирующие применение этого подхода: планирование рабочей силы, замена оборудования и стратегии инвестирования [4].

Планирование рабочей силы предполагает регулирование численности сотрудников в течение реализации проекта, продолжительностью n недель. Минимальная потребность в рабочей силе на i -й неделе составляет b_i человек. Однако из-за затрат на найм и увольнение может быть выгоднее отклоняться от минимальных значений. Если x_i – количество работающих на i -й неделе, то общие затраты включают:

- 1) затраты на содержание избытка рабочей силы: $C_1(x_i - b_i)$;
- 2) затраты на дополнительный найм: $C_2(x_i - x_{i-1})$.

Модель динамического программирования строится следующим образом:

- 1) этап i соответствует порядковому номеру недели $i=1, 2, \dots, n$;
- 2) решение на этапе i – выбор значения x_i (численность сотрудников);
- 3) состояние на этапе i – количество работающих на предыдущей неделе x_{i-1} .

Рекуррентное уравнение для минимизации затрат имеет вид:

$$f_i(x_{i-1}) = \min_{x_i \geq b_i} \{C_1(x_i - b_i) + C_2(x_i - x_{i-1}) + f_{i+1}(x_i)\}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (28)$$

где: $f_{n+1}(x_n) = 0$. Вычисления начинаются с последнего этапа ($i=n$) при условии $x_n=b_n$ и продолжаются в обратном порядке до $i=1$.

Задача замены оборудования связана с оптимизацией сроков эксплуатации механизмов. С увеличением возраста t механизма растут затраты на обслуживание $c(t)$, снижается прибыль $r(t)$, а его ликвидационная стоимость равна $s(t)$. Новый механизм стоит l . Решение принимается ежегодно: продолжить использование текущего механизма или заменить его.

Элементы модели:

1. Этап i – год $i=1,2,\dots,n$.
2. Решение на этапе i – эксплуатация или замена механизма.
3. Состояние на этапе i – возраст механизма t к началу года.

Функция $f_i(t)$ обозначает максимальную прибыль за годы от i до n при наличии механизма возраста t . Рекуррентное уравнение:

$$f_i(t) = \begin{cases} r(t) - c(t) + f_{i+1}(t+1) & (1) \\ r(0) + s(t) - l - c(0) + f_{i+1}(t) & (2) \end{cases}, \quad (29)$$

где: (1) - если эксплуатировать механизм, (2) - если заменить механизм.

6.2. Пример решения

Далее будет рассмотрено решение задачи оптимизации распределения трудовых ресурсов в железнодорожном строительстве.

Необходимо распределить 4 бригады по 10 человек (всего 40 рабочих) на строительство четырех объектов (I, II, III, IV) так, чтобы суммарный объем СМР был максимальным. При этом объем работ на каждом объекте зависит от численности привлеченных к нему рабочих и определяется по специальной матрице.

Методологическая основа и данные. Объем СМР (в тыс. рублей) для каждого объекта представлен в таблице 7 в зависимости от количества рабочих, направляемых на него. Значения указаны для дискретных значений численности: 0, 10, 20, 30 и 40 человек. Также значения отражают нелинейную зависимость от числа рабочих, включая эффект убывающей отдачи (например, для объекта I при 40 рабочих прирост СМР составил всего 2 тыс. руб. по сравнению с 30 рабочими).

Таблица 7 - Зависимость объема СМР от численности рабочих на объектах

Количество рабочих, чел.	Объект I	Объект II	Объект III	Объект IV
0	0	0	0	0
10	10	8	12	11
20	23	18	20	19
30	27	25	31	28
40	29	32	35	36

Примечание:

1. Значения в таблице 1 отражают нелинейную зависимость объема СМР от численности бригады. Например, для объекта I при увеличении численности с 10 до 20 человек объем растет на 13 тыс. руб., а дальнейшее увеличение до 40 человек дает лишь незначительный прирост (29 тыс. руб. против 23 тыс. руб. при 20 рабочих). Это указывает на эффект убывающей отдачи, характерный для многих производственных процессов.

2. Объект III демонстрирует наиболее высокую эффективность при 30 рабочих (31 тыс. руб.), тогда как объект IV достигает пика при максимальной численности (36 тыс. руб.).

Математическая формулировка задачи. Пусть x_i – количество рабочих, направляемых на объект i , где $i = 1, 2, 3, 4$.

Целевая функция:

$$\sum_{i=1}^4 f_i(x_i) \rightarrow \max, \quad (30)$$

где: $f_i(x_i)$ – функция объема СМР для объекта i , заданная таблицей 7.

Ограничения:

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 40, \quad x_i \in \{0, 10, 20, 30, 40\}. \quad (31)$$

Аналитические и вычислительные аспекты. Задача относится к классу целочисленного программирования с дискретными переменными. Следует учесть:

1. **Комбинаторная сложность:** общее число возможных распределений x_i составляет $5^4 = 625$ вариантов (поскольку каждый объект имеет 5 вариантов численности). Однако учет ограничения $\sum x_i = 40$ существенно сокращает пространство поиска.

2. **Эффективные методы решения:**

- **перебор с отсечением:** оптимизация путем анализа наиболее перспективных комбинаций, исключая явно нерациональные варианты (например, направление 40 рабочих на объект II, где максимальный объем — 32 тыс. руб., против 36 тыс. руб. на объект IV);

- **график зависимости:** Построение кривых $f_i(x_i)$ для каждого объекта позволяет визуализировать точки оптимума и их взаимосвязи.

Практические рекомендации:

1) **Анализ критических точек:** объект IV наиболее выгоден при максимальной загрузке (40 человек), тогда как объект I — даже при 40 рабочих приносит лишь 29 тыс. руб., что ниже, чем при 30 человеках. Это требует акцентировать ресурсы на объектах с наивысшей эффективностью.

2) **Баланс между объектами:** например, направление 30 рабочих на объект III (31 тыс. руб.) и 10 — на IV (11 тыс. руб.) дает суммарный результат 42 тыс. руб. Однако комбинация 20+20 (23+19 тыс. руб.) для объектов I и II превышает этот показатель (42 тыс. руб.).

Решение задачи методом динамического программирования. Метод включает этапы, где на каждом шаге оптимизируется распределение рабочих между объектами ($n = 1, 2, 3, 4$). Функции $q_n(x)$ описывают оптимальный объем СМР при использовании x рабочих для объектов.

Этап 1: распределение на один объект ($q_1(x)$). Значения $q_1(x)$ совпадают с $f_i(x_i)$ для объекта I (табл. 2).

$$q_1(x) = \max_{i=1} f_i(x). \quad (32)$$

Этап 2: распределение на два объекта ($q_2(x)$). Для рабочих перебираются все возможные варианты их распределения между объектами I и II:

$$q_2(x) = \max_{k \in \{0, 10, 20, 30, 40\}} [f_1(k) + f_2(x - k)]. \quad (33)$$

Результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8 - Оптимальные распределения для $n = 2$

Количество рабочих, чел.	$F_1(x)$	$F_2(x)$	$q_2(x)$
0	0	0	0
10	10	8	12
20	23	18	23
30	27	25	31
40	29	32	42

Этап 3: распределение на три объекта ($q_3(x)$). Используются предыдущие ($q_2(x)$) и добавляется объект III:

$$q_3(x) = \max_{k \in \{0,10,20,30,40\}} [q_2(k) + f_3(x-k)]. \quad (34)$$

Пример: для $x = 40$:

$$q_3(40) = \max \{q_2(30) + f_3(10), q_2(20) + f_3(20), \dots\} = 43 \text{ тыс. руб.}$$

Этап 4: распределение на четыре объекта ($q_4(x)$). Добавляется объект IV:

$$q_4(40) = \max_{k \in \{0,10,20,30,40\}} [q_3(k) + f_4(40-k)]. \quad (35)$$

Расчет для $x = 40$:

$$q_4(40) = \max \{q_3(30) + f_4(10), q_3(20) + f_4(20), \dots\} = 46 \text{ тыс. руб.}$$

В таблице 9 представлены итоговые функции оптимального распределения.

Таблица 9 - Итоговые функции оптимального распределения

Количество рабочих, чел.	$q_1(x)$	$q_2(x)$	$q_3(x)$	$q_4(x)$
0	0	0	0	0
10	10	10	12	12
20	23	23	23	23
30	27	31	35	35
40	29	41	43	46

Итоговое решение. Максимальный объем СМР — 46 тыс. рублей — достигается при следующем распределении:

- 20 человек на объект I (23 тыс. руб.);
- 10 человек на объект III (12 тыс. руб.);

- 10 человек на объект IV (11 тыс. руб.).

Объект II не вовлекается в оптимальный план из-за низкой эффективности при малых численностях.

Решение задачи можно осуществить с применением системы *Mathcad*, используя комплекс специально написанных подпрограмм (программных модулей), реализующих метод динамического программирования. Документ, решающий данную задачу, представлен на рисунках 21 – 23.

**Оптимальное распределение бригад по участкам строительства
железной дороги**

1) Исходные данные

n - число строящихся участков железной дороги
N - количество вариантов выполнения объемов СМР в зависимости от количества рабочих, тыс. руб.

$f :=$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 8 & 12 & 11 \\ 23 & 18 & 20 & 19 \\ 27 & 25 & 31 & 28 \\ 29 & 32 & 35 & 36 \end{pmatrix}$	- матрица распределения объемов СМР по участкам строительства железной дороги
--------	--	---

Рисунок 21 – Документ *Mathcad* с решением задачи распределения бригад по объектам железнодорожного строительства методом динамического программирования в *Mathcad*.

Блок «Исходные данные»

2) Блок решения

```

n := 4
N := last(f<0>)
TN, 2n-1 := 0

fi(a, b) := | n ← last(a)
              | for i ∈ 0..n      - подпрограмма поиска номера
              | c ← i if a1 = b   элемента из a при условии a = b
              | c

K(i, j, f, T) := | for k ∈ 0..i
                  | sk ← fk + Ti-k, j-2-1
                  | g ← max(s)
                  | um ← fi(s, g)      - подпрограмма решения уравнения Р. Беллмана
                  | k0 ← um
                  | k1 ← g
                  | k
    
```

Рисунок 22 – Документ *Mathcad* с решением задачи распределения бригад по объектам железнодорожного строительства методом динамического программирования в *Mathcad*.

Блок «Блок решения» (начало)

$j := 0..N$	$i := 0..2(n-1)$	
$T_{j,2 \cdot (n-1)+1} := K(j, n-1, f^{(n-1)}, T)_1$		- первый шаг - начальное условие, заполнение двух последних столбцов таблицы
$T_{j,2 \cdot (n-1)} := K(j, n-1, f^{(n-1)}, T)_0$		- второй шаг - заполнение двух предпоследних столбцов таблицы и т.д.
$T_{j,2 \cdot (n-2)+1} := K(j, n, f^{(n-2)}, T)_1$		
$T_{j,2 \cdot (n-2)} := K(j, n, f^{(n-2)}, T)_0$		
$T_{j,2 \cdot (n-3)+1} := K(j, n-1, f^{(n-3)}, T)_1$		
$T_{j,2 \cdot (n-3)} := K(j, n-1, f^{(n-3)}, T)_0$		
$T_{j,2 \cdot (n-4)+1} := K(j, n-2, f^{(n-4)}, T)_1$		
$T_{j,2 \cdot (n-4)} := K(j, n-2, f^{(n-4)}, T)_0$		
$\text{opt}(N, n) := \left \begin{array}{l} \xi_0 \leftarrow N \\ \text{for } k \in 0..n-1 \\ \quad \left \begin{array}{l} x_k \leftarrow T_{\xi_k, 2 \cdot k} \\ \xi_{k+1} \leftarrow \xi_k - x_k \end{array} \right. \\ \quad x \end{array} \right.$		
		- подпрограмма обратного хода в методе Р. Беллмана - определение оптимальных вложений в каждый проект
$F_{\max} := T_{N, 1}$		

Рисунок 22 – Документ *Mathcad* с решением задачи распределения бригад по объектам железнодорожного строительства методом динамического программирования в *Mathcad*. Блок «Блок решения» (окончание)

3) Результаты решения

$$T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 & 12 & 1 & 12 & 1 & 11 \\ 2 & 23 & 0 & 23 & 1 & 23 & 2 & 19 \\ 2 & 35 & 1 & 31 & 3 & 31 & 3 & 28 \\ 2 & 46 & 0 & 42 & 3 & 42 & 4 & 36 \end{pmatrix}$$

- таблица с результатами промежуточных расчетов

$$\text{opt}(4, 4) = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

- распределение бригад по участкам строительства железной дороги

$$F_{\max} = 46 \quad \text{- максимальный объем СМР, тыс. руб.}$$

Рисунок 23 – Документ *Mathcad* с решением задачи распределения бригад по объектам железнодорожного строительства методом динамического программирования в *Mathcad*. Блок «Результаты решения»

7. Формирование оптимальных комплектов машин для реализации технологического процесса возведения объекта железнодорожного пути

7.1. Теоретические основы

В рамках разработки организационно-технологических решений для строительства объектов железнодорожного пути актуальной задачей является формирование оптимального комплекта машин для выполнения заданного технологического процесса. В частности, это касается задачи, где процесс включает в себя n работ, каждая из которых может быть реализована различными типами и типоразмерами машин. Ключевой характеристикой, определяющей выбор машин, являются *удельные приведенные затраты* — нормированные показатели, учитывающие стоимость эксплуатации, время выполнения операции, ресурсоемкость и другие факторы, что обеспечивает их сравнимость между различными машинами и работами. Целью является минимизация общей суммы приведенных затрат на весь технологический процесс [3].

Исходные данные и структура задачи. Исходная информация для решения задачи представлена в таблице 10, где для каждой работы (строки 1–5) указаны приведенные затраты на выполнение каждой машиной с типоразмерами $k=1, 2, 3$ для трех групп работ $j=1, 2, 3$. Каждая группа j соответствует этапам или «подработам», которые требуют выбора оптимальной техники. Данные в таблице представлены следующим образом:

Таблица 10 - Приведенные затраты на выполнение работ различными машинами

Номер работы	$j=1$ ($k=1$)	$j=1$ ($k=2$)	$j=1$ ($k=3$)	$j=2$ ($k=1$)	$j=2$ ($k=2$)	$j=2$ ($k=3$)	$j=3$ ($k=1$)	$j=3$ ($k=2$)	$j=3$ ($k=3$)
1	46	48	35	—	—	—	—	—	—
2	157	150	145	155	150	146	165	162	160
3	54	58	—	56	60	—	58	62	—
4	21	24	—	20	18	—	—	—	—
5	0	—	—	0	—	—	—	—	—

Примечание: Знак «—» означает, что соответствующий тип машины недоступен для данной комбинации работы и группы j .

Математическая формулировка задачи. Для формализации задачи введем следующие обозначения:

- $x_{j,k}$ — бинарная переменная, принимающая значение 1, если для группы j работы выбран тип машины k , и 0 — в противном случае.
- $c_{j,k}$ — приведенные затраты для группы j работы и машины типа k (таблица 10).

Целевая функция (минимизация общих затрат):

$$Z = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 c_{jk} \cdot x_{jk} \rightarrow \min . \quad (36)$$

Ограничения:

1. Для каждой группы j работы должен быть выбран *ровно один тип машины*:

$$\sum_{k=1}^3 x_{jk} = 1 \quad \forall j \in \{1, 2, 3\} . \quad (37)$$

2. Переменные $x_{j,k}$ могут принимать только значения 0 или 1.

Однако важно учитывать *ограничения доступности машин*, отраженные в таблице 10 (например, для работы 1 и группы $j=1$ доступны только машины $k=1, 2, 3$, тогда как для группы $j=2$ и $j=3$ машины недоступны). Эти условия определяются как:

$$x_{jk} = 0, \text{ если } c_{jk} = - . \quad (38)$$

Особенности задачи и методы решения. Задача относится к классу *задач комбинаторной оптимизации* с дискретным выбором. Ее особенностью является *независимость* решений для каждой группы j : выбор машины для одной группы не влияет на выбор для других. Это упрощает задачу, так как она разбивается на три подзадачи (по количеству групп j), каждая из которых решается независимо.

Для каждой группы j необходимо выбрать машину с минимальной $c_{j,k}$ из доступных (без учета «←»). Например:

Для группы $j = 1$:

- работа 1: минимальная стоимость 35 ($k = 3$);
- работа 2: минимальная стоимость 145 ($k = 3$);
- работа 3: минимальная стоимость 54 ($k = 1$).

Такой подход приводит к *построению оптимального комплекса машин*, где для каждой работы и группы j выбрано оптимальное решение.

Графовое представление и анализ комбинаторных связей в технологическом процессе. Одним из ключевых аспектов оптимизации технологических процессов является визуализация и формализация взаимосвязей между машинами, участвующими в различных работах. В рамках изучаемой задачи, где требуется выбрать оптимальный комплекс машин для выполнения n работ, *сетевой граф* становится эффективным инструментом для представления всех возможных вариантов [3].

Структура сетевого графа и его элементы. Сетевой граф (рисунок 24) отражает последовательность работ и допустимые переходы между типами машин. Каждая работа в графе изображается стрелкой, а узлы (кружочки) символизируют завершение одной работы и начало следующей с использованием определенной машины [3].

Стрелка между узлами указывает направление выполнения работ, а над ней записаны *приведенные затраты* c_{ijk} , характеризующие стоимость выполнения i -й работы машиной типа k после использования машины типа j на предыдущей работе.

Узел содержит два числа:

- нижнее число — тип машины, использованной на предыдущей работе;
- верхнее число — *сквозная нумерация*, позволяющая идентифицировать допустимые последовательности машин.

Начальный и конечный узлы (номера 0 и 11) обозначают соответственно начало и завершение технологического процесса.

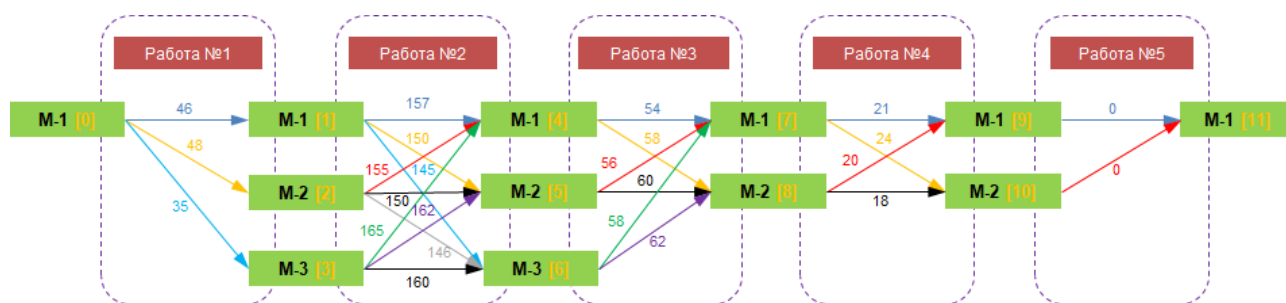


Рисунок 24 – Сетевой граф возможных комплексов машин

Ограничения и их влияние на структуру графа. Одним из критических аспектов является учет *технических ограничений* между машинами. Например, при выполнении работы по перевозке грунта, если габариты или грузоподъемность машины не совместимы с параметрами землеройной машины, между ними не может быть связи (стрелка отсутствует в графе). Такие ограничения формализуются как:

если $c_{ijk} = \text{«недопустимо»}$ \rightarrow стрелка ($j \rightarrow k$) отсутствует.

Это упрощает анализ, так как исключает нерациональные комбинации из рассмотрения. В текущей задаче (таблица 10), количество допустимых машин на каждой работе различается:

- на 1-й и 2-й работах — по 3 типа машин;
- на 3-й и 4-й работах — по 2 типа;
- 5-я работа требует единичного типа машины (например, фиктивная или обязательная).

Это приводит к общему числу возможных комплексов:

$$N = 3 \times 3 \times 2 \times 2 = 36 \text{ вариантов.}$$

Алгоритмический подход к решению. Представленный граф позволяет применять методы комбинаторной оптимизации для поиска минимальных затрат. Например:

- 1) *поиск кратчайшего пути* от начального узла (0) к конечному (11) с учетом весов $C_{i,j,k}$.
- 2) *динамическое программирование* для минимизации суммарных затрат при переходах между машинами.

Пример расчета:

- на первой работе выбор между машинами 1, 2, 3 (затраты 46, 48, 35). Минимальный вариант — машина 3 (35).
- на второй работе из узла 3 (машина 3 на первой работе) переходы к машинам 1, 2, или 3 (затраты 145, 150, 146). Наименьшая — 145 (машина 3).

Таким образом, оптимальная последовательность формируется как путь с наименьшими суммарными затратами.

Комбинаторная сложность и масштабируемость. Задача относится к классу *NP-трудных комбинаторных задач*, где количество вариантов растет экспоненциально с увеличением числа работ и машин на каждой из них. Например, если добавить еще одну работу с четырьмя типами машин, общее число вариантов станет:

$$36 \times 4 = 144 \text{ (для двух новых операций).}$$

Это подчеркивает необходимость использования эффективных алгоритмов или аппроксимаций для реальных производственных систем.

Практическая значимость. Сетевой граф обеспечивает:

- 1) *наглядность* – визуализация всех допустимых комбинаций;
- 2) *автоматизацию* – возможность интеграции в информационные системы для быстрого поиска оптимальных путей;
- 3) *расширяемость* – учет дополнительных ограничений (например, время работы машин, износ) за счет модификации графа.

Математическое моделирование и применение динамического программирования.

Для решения задачи формирования оптимального комплекса машин в технологическом процессе, целесообразно использовать *метод динамического программирования*. Этот подход позволяет минимизировать количество вариантов, требующих рассмотрения, путем разбиения задачи на последовательные этапы и применения принципа оптимальности Беллмана.

Согласно принципу оптимальности, *любой оптимальный путь* в процессе принятия решений обладает тем свойством, что последующие решения также должны быть оптимальными, независимо от предыдущих результатов выбора. Это означает, что для определения наилучшего комплекса машин на всех этапах процесса достаточно последовательно оптимизировать каждую работу, учитывая минимальные затраты от текущего этапа до конца.

Формализация задачи через динамическое программирование. Технологический процесс, состоящий из n работ, разбивается на *этапы*, где каждый этап соответствует выбору машины для конкретной работы [3]. Например:

- *этап 1*: выбор машины для 1-й работы;
- *этап 2*: выбор машины для 2-й работы, учитывая выбор на этапе 1;
- и так далее до этапа n .

Для каждого этапа вводится функция $y(i, j)$, которая обозначает *минимальные приведенные затраты* при выполнении работы с i -й по n -ю, начиная с машины типа j на работе i . Цель – найти $y(1, 0)$, где 0 обозначает начальное состояние (до выполнения первой работы).

Функциональное уравнение Беллмана. Для построения модели используется рекуррентное соотношение:

$$y(i, j) = \min [c(i, j, k) + y(i+1, k)], \quad (39)$$

где:

- $c(i, j, k)$ – приведенные затраты на выполнение i -й работы машиной типа k после использования машины типа j на предыдущей работе (таблица 10).
- K_i – множество допустимых машин для i -й работы (например, для работы 1: $K_1 = \{1, 2, 3\}$).

Граничные условия:

- для последней работы ($i = n$):

$$y(n, j) = c(n, j, k) \quad \forall j \in K_{n-1}. \quad (40)$$

- начальное состояние:

$$y(1, 0) = \min_{k \in K_1} [c(1, 0, k) + y(2, k)]. \quad (41)$$

Пример расчета на основе сетевого графа. Рассматривается технологический процесс, состоящий из пяти работ (рисунок 24). Для упрощения можно взять $n=2$ (первые две работы).

На этапе 2 (вторая работа): для каждой машины j на первой работе вычисляются минимальные затраты на завершение процесса:

$$y(2, j) = \min_{k \in K_1} [c(2, j, k) + y(3, k)], \quad (42)$$

где: k – оптимальный выбор машины для второй работы.

На этапе 1 (первая работа): выбирается машина k с минимальным значением $c(1, 0, k) + y(2, k)$.

Преимуществами метода являются:

1. *Снижение вычислительной сложности*: вместо перебора всех $N = 3 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 2 = 36$ вариантов метод динамического программирования разбивает задачу на подзадачи. Для n работ сложность сокращается до $O(n \cdot t^2)$, где t – максимальное число машин на этапе.

2. *Учет последовательных ограничений*: например, невозможность использования машины k после j (из-за совместимости) фиксируется как $c(i, j, k) = \infty$, что исключает недопустимые переходы в расчетах.

3. *Адаптивность*: метод легко адаптируется для учета дополнительных критериев (например, времени выполнения, надежности машин), если они включены в функцию $c(i, j, k)$.

Алгоритм решения:

1) *инициализация*: задать начальные условия и таблицу $c(i, j, k)$;

2) *обратный проход*: начиная с последней работы, вычислить $y(i, j)$ для всех допустимых j и i от n до 1;

3) *прямой проход*: восстановить оптимальную последовательность машин, используя сохраненные значения k при вычислении минимума.

7.2. Пример решения

Для решения задачи формирования оптимального комплекса машин в технологическом процессе, применение *динамического программирования* обеспечивает системный подход к минимизации приведенных затрат. Метод основан на принципе оптимальности Беллмана, разбивающем задачу на последовательные этапы и упрощающем вычисления за счет рекуррентных соотношений.

Алгоритм состоит из двух этапов. Первый этап: Обратный проход (вычисление минимальных затрат). Цель этапа — определить минимальные приведенные затраты $y(i, j)$ для всех возможных состояний (комплексов машин), начиная с конца технологического процесса и двигаясь к началу.

1. *Инициализация*: для последней работы (5-й) приведенные затраты задаются как:

$$y(5, j) = c(5, j, k) \quad \forall j \in K_5. \quad (43)$$

где: $c(5, j, k) = 0$ (таблица 10), так как пятая работа требует единичного типа машины.

2. *Шаг 1 (работа 4)*:

$$y(4, j) = \min_{k \in K_4} [c(4, j, k) + y(5, k)], \quad (44)$$

где: $K_4 = \{1, 2\}$. Например: для $j = 1$:

$$y(4, 1) = \min [21 + 0, 24 + 0] = 21, \quad (45)$$

3. *Шаг 2 (работа 3)*:

$$y(3, j) = \min_{k \in K_3} [c(3, j, k) + y(4, k)], \quad (46)$$

где: $K_3 = \{1, 2\}$. Например: для $j = 1$:

$$y(3, 1) = \min [54 + 21, 56 + 20] = 75. \quad (47)$$

4. *Шаг 3 (работа 2)*:

$$y(2, j) = \min_{k \in K_2} [c(2, j, k) + y(3, k)], \quad (48)$$

где: $K_2 = \{1, 2, 3\}$. Например: для $j = 1$:

$$y(2,1) = \min [157 + 21, 150 + 20, 145 + 18] = 145 + 18 = 163. \quad (49)$$

5. Шаг 4 (работа 1):

$$y(1, j) = \min_{k \in K_1} [c(1, j, k) + y(2, k)], \quad (50)$$

где: $K_1 = \{1, 2, 3\}$. Например: для начального состояния $j = 0$:

$$y(0,1) = \min [224 + 46, 225 + 48, 239 + 35] = 224 + 46 = 270. \quad (51)$$

Второй этап: Прямой проход (восстановление оптимальной последовательности).

После вычисления всех $y(i, j)$ определяются конкретные машины, обеспечившие минимум. Например:

- на этапе 1 (работа 1): выбрана машина $k = 3$ ($c = 35$), так как она входит в минимальный путь;
- на этапе 2 (работа 2): машина $k = 3$ ($c = 145$);
- на этапе 3 (работа 3): машина $k = 1$ ($c = 54$);
- на этапе 4 (работа 4): машина $k = 1$ ($c = 21$).

Оптимальный комплекс машин (рисунок 25):

$$M(1, 3) \rightarrow M(2, 3) \rightarrow M(3, 1) \rightarrow M(4, 1)$$

со сквозной нумерацией $0 \rightarrow 1 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow 11$ (рисунок 26).

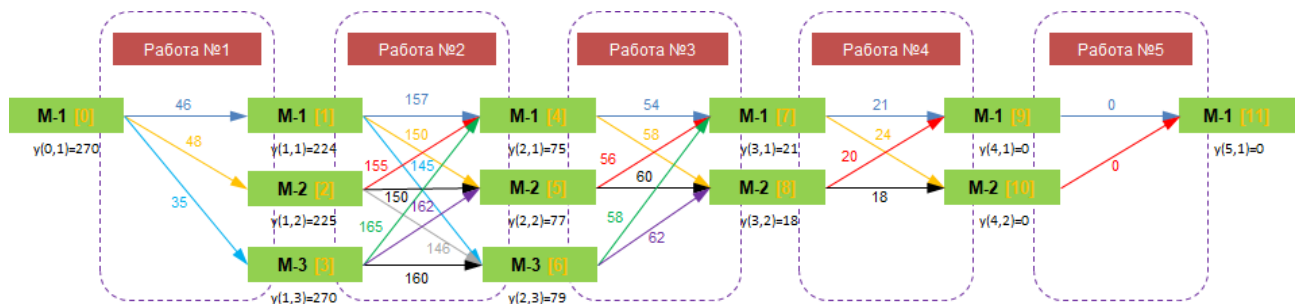


Рисунок 25 – Граф возможных комплектов машин с результатами расчета

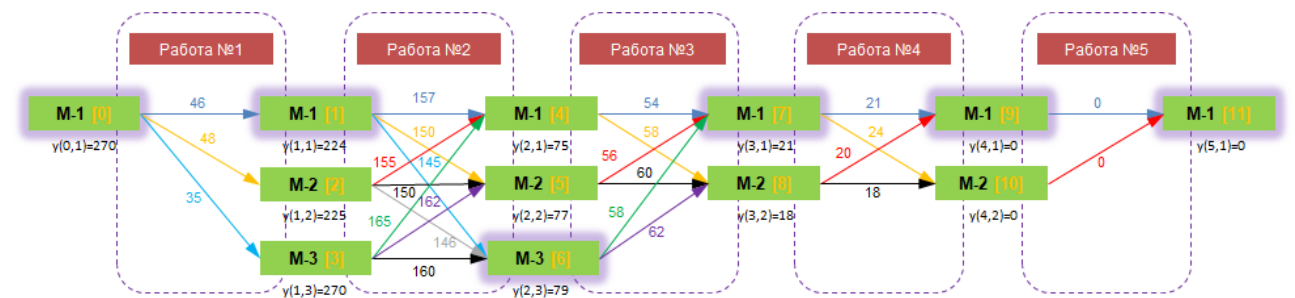


Рисунок 26 – Граф с выделенными вершинами оптимального комплекта машин

Для автоматизации расчетов предложен документ *Mathcad*, в котором:

1) считывается число работ в технологическом процессе, число типоразмеров машин способных выполнять определенную работу, удельные приведенные затраты на выполнение работ машинами (таблица 10).

2) с помощью написанного программного кода выполняется обратный проход, используя функциональное уравнение Беллмана;

3) восстанавливается оптимальная последовательность машин;

4) выводятся результаты:

- минимальные затраты;
- список машин в оптимальном комплексе.

Программный код, представленный на рисунках 27 – 29, имеет особенности:

1) снижает вычислительную сложность с 36 вариантов до 0;

2) учитывает технические ограничения (например, недопустимые переходы);

3) обеспечивает прозрачность процесса выбора за счет сохранения промежуточных решений.

Формирование оптимальных комплектов машин для реализации технологического процесса возведения объекта железнодорожного пути

1) Исходные данные

N - число работ в технологическом процессе
M - число типоразмеров машин способных выполнять i-ю работу
 C_i - удельные приведенные затраты при выполнении i-ой работы k-ой машиной после выполнения j-ой машиной (i-1) - работы

ORIGIN := 1

N := 5

$M := \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$	$C_1 := \begin{pmatrix} 49 & 51 & 38 \\ 160 & 153 & 148 \\ 57 & 61 & 59 \\ 24 & 27 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$C_2 := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 158 & 153 & 149 \\ 59 & 63 & 53 \\ 23 & 21 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$C_3 := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 168 & 165 & 163 \\ 61 & 65 & 63 \\ 26 & 25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
---	--	---	---

Рисунок 27 – Документ *Mathcad* с решением задачи формирования оптимальных комплектов машин для реализации технологического процесса возведения объекта железнодорожного пути в *Mathcad*. Блок «Исходные данные»

```

2) Блок решения

NR := N + 1

g := MM ← -1
for i ∈ 1..NR
  MI ← M1
  for j ∈ 1..MI
    MM ← MM + 1
    NMi,j ← MM
  NM1 ← NR - 1
  NM2 ← NR - 2
  i ← NR - 1
  MI ← M1
  for j ∈ 1..MI
    Fi,j ← (Cj)i,1
    NNi,j ← NMNR,1
  for ii ∈ 1..NM2
    i ← NR - ii - 1
    MI ← M1
    MIP1 ← Mi+1
    for j ∈ 1..MI
      Fi,j ← (Cj)i,1 + Fi+1,1
      NNi,j ← NMi+1,1
      for k ∈ 2..MIP1
        if Fi,j > (Cj)i,k + Fi+1,k
          Fi,j ← (Cj)i,k + Fi+1,k
          NNi,j ← NMi+1,k
    MO1 ← NM1,1
    MO2 ← NN1,1

```

- программа выбора оптимального комплекса машин методом Беллмана

Рисунок 28 – Документ *Mathcad* с решением задачи формирования оптимальных комплектов машин для реализации технологического процесса возведения объекта железнодорожного пути в *Mathcad*. Блок «Блок решения»

3) Результаты решения

$$\xi = \begin{pmatrix} \{1,6\} \\ \{3,5\} \\ 280 \\ \{2,5\} \end{pmatrix} \quad - \text{общий результат}$$

$\xi_1 = (0 \ 1 \ 5 \ 9 \ 10 \ 12)$ - оптимальный комплект включает машины при сплошной нумерации (MO_i)

$\xi_2 = \begin{pmatrix} 280 & 231 & 81 & 24 & 0 \\ 0 & 231 & 78 & 21 & 0 \\ 0 & 243 & 85 & 25 & 0 \end{pmatrix}$ - матрица последовательного определения минимальных суммарных затрат

$\xi_3 = 280$ - минимальные суммарные затраты на выполнение всего процесса, начиная с 0-й работы 1-ой машиной до конца завершения технологического (производственного) процесса

$\xi_4 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ - оптимальный комплект машин. В матрице столбец - это номер машины, выбранной для выполнения i -ой работы k -ой машиной

Рисунок 29 – Документ *Mathcad* с решением задачи формирования оптимальных комплектов машин для реализации технологического процесса возведения объекта железнодорожного пути в *Mathcad*. Блок «Результаты решения»

8. Расчет организации работ по сооружению земляного полотна на термопросадочных вечномерзлых грунтах

8.1. Теоретические основы

Способ организации строительства железнодорожного земляного полотна на термопросадочных грунтах возможен по одно- и двухэтапной отсыпке насыпи с применением кондиционных грунтов, обеспечивающей устойчивость сооружения в условиях сезонного промерзания и оттаивания. На просадочных грунтах возведение земляного полотна допускается выполнять в один этап, аналогично высокие насыпи (более 3 м) на термопросадочном основании могут сооружаться одномоментно при условии полного промерзания деятельного слоя естественного основания к началу строительства и достаточного термического сопротивления насыпи для предотвращения протаивания грунтов в теплый период года. Во всех иных случаях рекомендуется двухэтапная технология: на первом этапе отсыпается насыпь пониженного профиля (НПП), которая в летний период проседает в оттаивающий слой основания, а на втором этапе после полного промерзания основания под НПП производится досыпка до проектной отметки. Данный метод позволяет значительно снизить величину осадки естественного основания, что дает возможность проектировать узкую основную площадку насыпи и достигать существенного технико-экономического эффекта за счет сокращения объемов работ по ликвидации просадок в периоды строительства и эксплуатации железной дороги [2].

Особенности проектирования НПП включают необходимость минимизации её высоты (рекомендуемое значение – не более 1 м) для снижения термического сопротивления, замедляющего протаивание грунтов основания, и обеспечения максимальной осадки последнего. При этом масса НПП напрямую влияет на интенсивность просадки, поэтому расчеты должны учитывать баланс между минимальной высотой, достаточной для нормального прохода транспорта и техники. На участках с проектной высотой земляного полотна, меньшей высоты НПП, рекомендуется использовать кондиционные скальные грунты для усиления процесса просадки в оттаивающем слое основания. В работе представлена методика расчета объема земляных работ при строительстве на термопросадочных грунтах, а также алгоритмы организации работ с примерами вычислений для различных вариантов длины $L_{ул}$ и $V_{пп}$.

В таблице 11 приведены условные обозначения величин и единиц измерения, используемые в расчетах.

Таблица 11 - Перечень основных параметров, их условных обозначений (символов) и единиц измерения (начало)

Параметр	Символ	Единица измерения
Ширина основной площадки насыпи	b	м
Высота насыпи	h_H	м
Высота насыпи пониженного профиля	$h_{НПП}$	м

Таблица 11 - Перечень основных параметров, их условных обозначений (символов) и единиц измерения (*продолжение*)

Коэффициенты:		
внутрисменных потерь рабочего времени	K_{BC}	см
сменности	K_{CM}	см/день
целодневных потерь	$K_{ЦДП}$	-
эффективности организации земляных работ	$K_{Э}$	-
Число календарных дней на перебазировки машин с объекта на объект, приходящееся на 1 ч работы машины	K_1	дн/ч
Число календарных дней на ремонты и техническое обслуживание машин, приходящееся на 1 ч работы машины	K_2	дн/ч
Длина рабочего участка подразделения	L_M	км
Протяженность участка линии	$L_{УЛ}$	км
Показатель крутизны откоса насыпи	t	-
Общая потребная вооруженность подразделений, ведущих земляные работы на участке	N_{KK}	к. ковш
Число дней в неделе:		
выходных	$n_{ДВ}$	дн
отгульных	$n_{ДВО}$	дн
совместных выходных	$n_{ДВС}$	дн
Число праздничных дней в году	$n_{ДП}$	дн
Число дней на передислокацию подразделения на новый участок	$n_{ДПД}$	дн
Годовое число дней простоя по метеоусловиям	$n_{ДПМ}$	дн
Годовое число дней распутицы	$n_{ДРД}$	дн
Необходимая вооруженность подразделения	n_{KK}	к. ковш
Необходимая численность работающих в подразделении	n_L	чел.
Необходимое число подразделений, ведущих земляные работы	n_M	-
Число недель в году	$n_{НЕД}$	нед
Число совмещенных праздничных дней и дней простоя по метеоусловиям	n'	дн
Часовая производительность землеройной машины экскаватора или скрепера на единицу вооруженности	Q_{KK}	м ³ /ч-к. ковш
Срок занятости подразделения на участке	$t_{ЗР}$	мес

Таблица 11 - Перечень основных параметров, их условных обозначений (символов) и единиц измерения (окончание)

Срок занятости подразделения на участке по выходным дням	$t_{ПВ}$	дн
Время передислокации	$t_{ПД}$	мес
Срок занятости подразделения на участке с учетом метеоусловий	$t_{ПМ}$	дн
Срок занятости подразделения на участке в период распутицы	$t_{ПР}$	дн
Целодневные потери времени в году по праздничным дням	$t_{ПП}$	дн
Целодневные потери времени в году на передислокацию	$t_{ППД}$	дн
Продолжительность смены	$t_{СМ}$	час
Объем выемок на линии	V_B	тыс. м
Годовая выработка подразделения	V_M	тыс. м ³ /год
Годовая выработка подразделения на единицу вооруженности	$V_{КК}$	м ³ /ч-к. ковш
Объем насыпей на линии	V_H	тыс. м ³
Остаточный объем насыпей на линии (без учета насыпей пониженного профиля)	$V_H^{ост}$	тыс. м ³
Объем насыпей пониженного профиля на линии	$V_{НПП}$	тыс. м ³
Объем покилометровый профильный	$V_{ПП}$	тыс. м ³
Суммарный объем насыпей пониженного профиля и выемок, приходящийся на 1 км линии	$V'_{ПП}$	тыс. м ³ /км
Остаточный объем насыпей (без учета насыпей - пониженного профиля) приходящийся на 1 км линии	$V''_{ПП}$	тыс. м ³ /км
Отношение покилометрового рабочего объема земляных работ к профильному	α	-
Удельный вес насыпей по объему	β	-
Удельный вес земляных работ, выполняемых соответствующими машинами (экскаваторами или скреперами) в общем объеме	δ	-
Удельное время разворачивания, сворачивания земляных работ	τ_p, τ_c	мес/км

Расчет объемов земляных работ при сооружении земляного полотна на термопросадочных вечномерзлых грунтах. При расчете объемов земляных работ воспользуемся моделированием местности двускатными плоскостями [1]. Типовой элемент профиля представлен на рисунке 30. Сооружение земляного полотна по двухэтапной технологии включает разработку выемок и возведение насыпей пониженного профиля на первом этапе и досыпку насыпей до проектных отметок на втором [2].

Для вычисления объема насыпи воспользуемся известной формулой объема трапецеидального, клина. Тогда объем насыпи (рисунки 30 и 31) составит

$$V_{H1} = \left(\frac{b}{2} + \frac{mh_{H1}}{3}\right)h_{H1}L_1 + \left(\frac{b}{2} + \frac{mh_{H1}}{3}\right)h_{H1}L_2 = \left(\frac{b}{2} + \frac{mh_{H1}}{3}\right)h_H L_{yH}, \quad (52)$$

где: L_{yH} – протяженность насыпи.

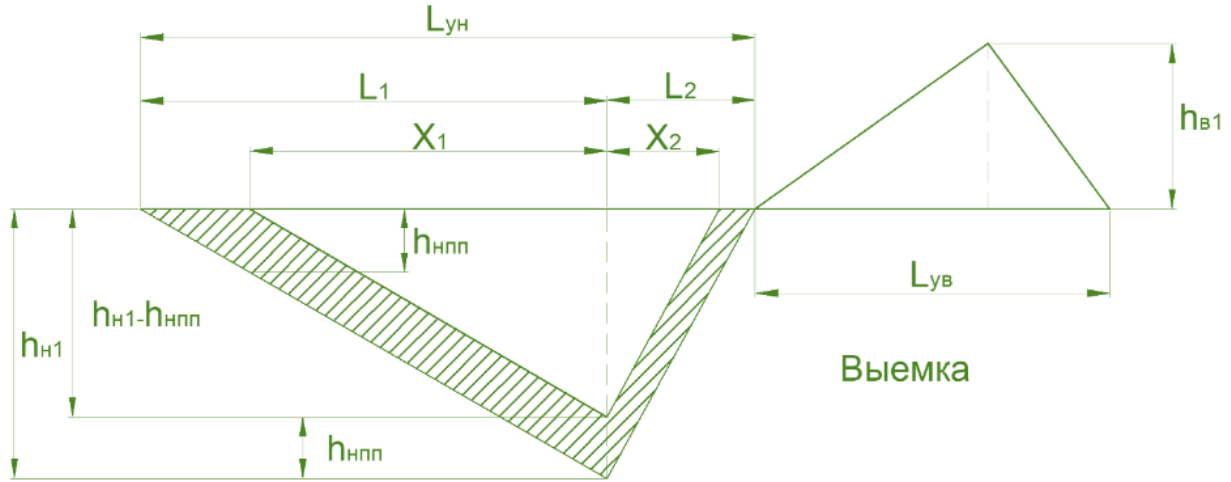


Рисунок 30 - Элемент продольного профиля земляного полотна

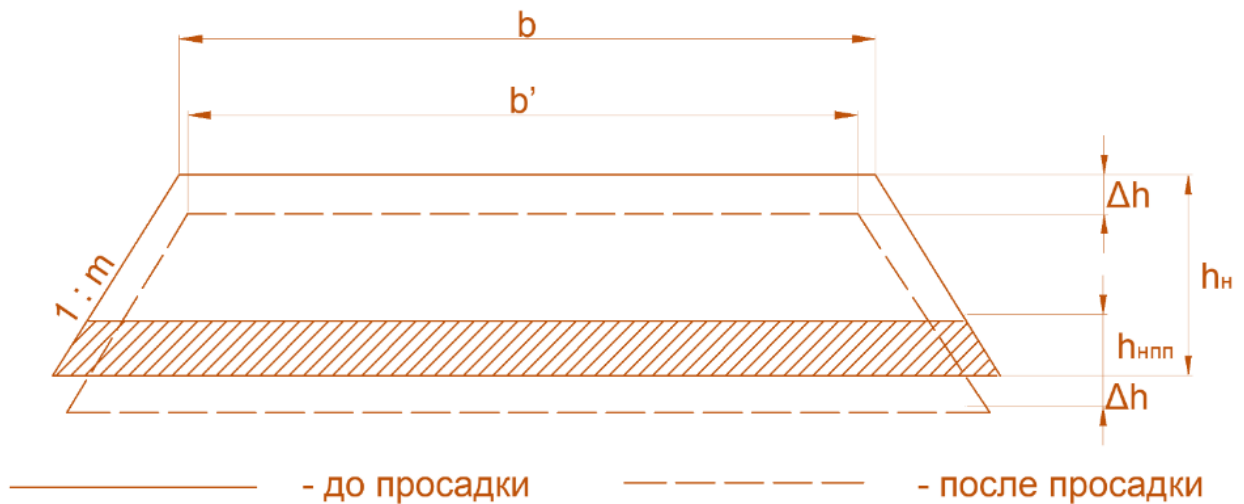


Рисунок 31 - Поперечник земляного полотна

Для того, чтобы вычислить объем насыпи пониженного профиля необходимо из V_{H1} вычесть сумму объемов двух клиньев, длины которых соответственно равны X_1 и X_2 . Тогда получим

$$V_{Hпп1} = V_{H1} - \left[\left(\frac{b}{2} + \frac{m(h_{H1} - h_{Hпп})}{3}\right)(h_{H1} - h_{Hпп})x_1 + \left(\frac{b}{2} - \frac{m(h_{H1} - h_{Hпп})}{3}\right)(h_{H1} - h_{Hпп})x_2\right], \quad (53)$$

где: $h_{НПП}$ – высота насыпи пониженного профиля;

b – необходимая ширина основной площадки из условия досыпки насыпи после ее просадки:

$$b = b' + 2\Delta h \cdot m, \quad (54)$$

где: b' – проектная ширина основной площадки насыпи;

Δh – величина просадки основания насыпи;

m – показатель крутизны откоса.

Из рисунка 30 следует, что

$$x_1 = \frac{L_1(h_{H1} - h_{НПП})}{h_H}, \quad x_2 = \frac{L_2(h_{H1} - h_{НПП})}{h_H}.$$

Тогда, подставив эти выражения в (53), получим

$$V_{НПП1} = V_{H1} - \left[\left(\frac{b}{2} + \frac{m(h_{H1} - h_{НПП})}{3} \right) (h_{H1} - h_{НПП}) \left(\frac{L_1(h_{H1} - h_{НПП})}{h_{H1}} \right) + \left(\frac{b}{2} + \frac{m(h_{H1} - h_{НПП})}{3} \right) (h_{H1} - h_{НПП}) \left(\frac{L_2(h_{H1} - h_{НПП})}{h_{H1}} \right) \right], \quad (55)$$

После преобразований выражения (55) получим

$$V_{НПП1} = V_{H1} - \left[\left(\frac{b}{2} + \frac{m(h_{H1} - h_{НПП})}{3} \right) \cdot \frac{(h_{H1} - h_{НПП})^2 L_{\Sigma H}}{h_{H1}} \right], \quad (56)$$

Из (52) следует:

$$L_{\Sigma H} = \frac{V_{H1}}{\left(\frac{b}{2} + \frac{mh_{H1}}{3} \right) h_{H1}}. \quad (57)$$

Подставив (57) в (56), после несложных преобразований имеем

$$V_{НПП1} = V_{H1} \left[1 - \frac{3b(h_{H1} - h_{НПП})^2 + 2m(h_{H1} - h_{НПП})^3}{3bh_{H1}^2 + 2mh_{H1}^3} \right]. \quad (58)$$

Таким образом,

$$V_{НПП1} = K_1 V_{H1},$$

где: K_1 – коэффициент, характеризующий отношение объема насыпи пониженного профиля к общему объему насыпи:

$$K_1 = 1 - \frac{3b(h_{H1} - h_{НПП})^2 + 2m(h_{H1} - h_{НПП})^3}{3bh_{H1}^2 + 2mh_{H1}^3}, \quad (59)$$

Индекс «1» в формулах (58), (59) соответствует «номеру» конкретной насыпи на участке линии.

При постоянстве b , m , $h_{нпп}$ для конкретной насыпи коэффициент K зависит только от ее высоты. Понятно, что выражение (59) справедливо для $h_H > h_{нпп}$. В случае, когда $h_H \leq h_{нпп}$, имеем $K=1$.

Из рисунка 32 следует, что общий объем всех насыпей на участке линии

$$V_H = V_{H1} + V_{H2} + \dots + V_{Hn} = \sum_{i=1}^n V_{Hi} \quad (60)$$

Тогда суммарный объем насыпей пониженного профиля на участке линии

$$V_{нпп} = \sum_{i=1}^n V_{нппi} = \sum_{i=1}^n K_i V_{Hi} \quad (61)$$

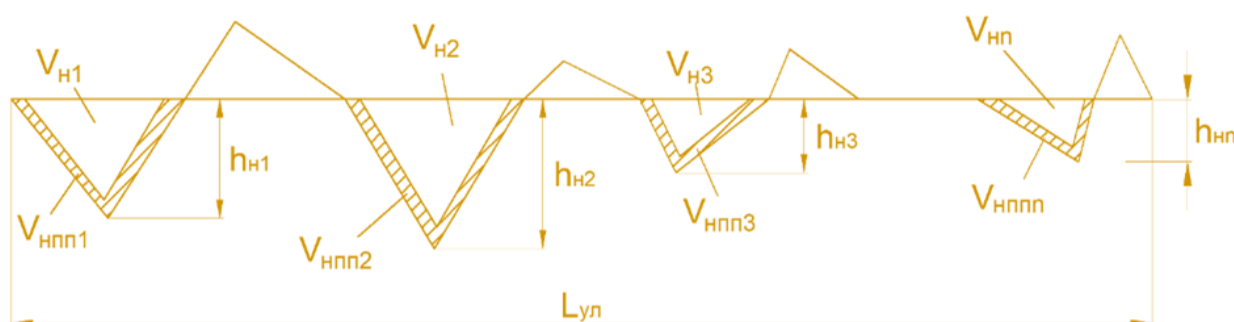


Рисунок 32 – Продольный профиль участка линии

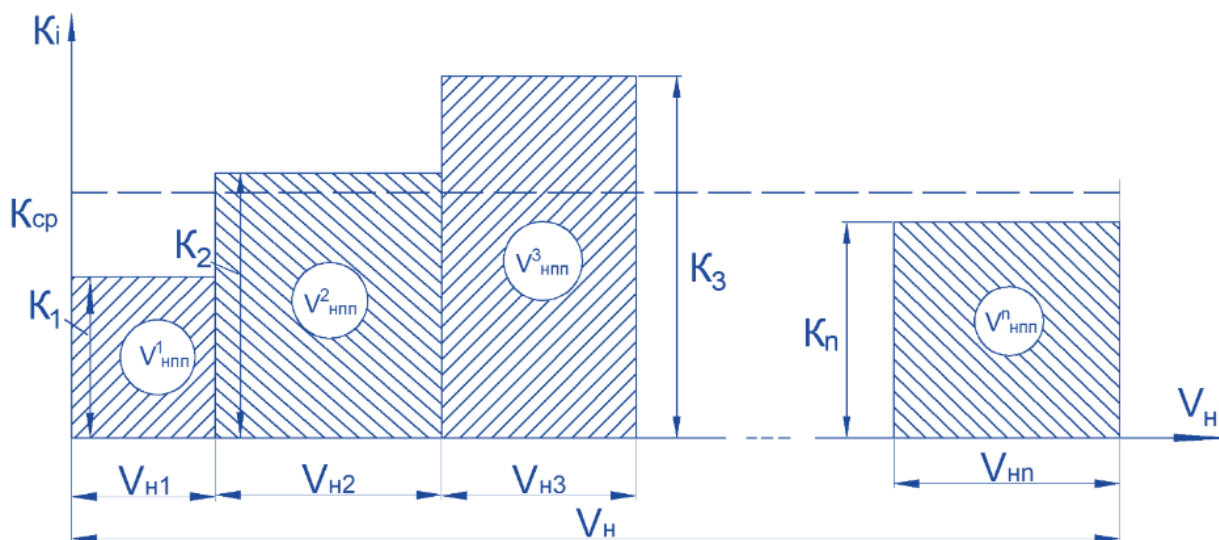


Рисунок 33 – Вычисление суммарного объема насыпей пониженного профиля на участке линии

Для вычисления $V_{нпп}$ удобно воспользоваться графическими построениями, приведенными на рисунке 33, из которого видно, что $V_{нпп}$ является суммарной площадью всех прямоугольников, т.е. интегралом соответствующей ступенчатой функции. Тогда, используя известное выражение для приближенного вычисления интеграла, будем иметь

$$V_{\text{III}} \approx K_{\text{CP}} \sum_{i=1}^n V_{\text{Hi}} = K_{\text{CP}} V_{\text{H}}, \quad (62)$$

где: K_{CP} – среднее значение коэффициента K для всех насыпей на участке линии $L_{\text{УЛ}}$.

Подставив в (62) K_{CP} с учетом выражения (59), получим

$$V_{\text{III}} \cong V_{\text{H}} \left[1 - \frac{3b(h_{\text{H}} - h_{\text{III}})^2 + 2m(h_{\text{H}} - h_{\text{III}})^3}{3bh_{\text{H}}^2 + 2mh_{\text{H}}^3} \right], \quad (63)$$

где: h_{H} – средняя представительная высота насыпи по всему множеству насыпей на участке линии.

Исследование расчетов объемов земляных масс позволило получить выражения статической зависимости представительной высоты и объема насыпи от километрового профильного объема V_{III} [1]:

$$h_{\text{H}} = 0,361 \cdot V_{\text{III}}^{0,74}, \quad (64)$$

$$V_{\text{H}} = V_{\text{III}} \cdot \beta_{\text{H}} \cdot L_{\text{УЛ}}, \quad (65)$$

где: β_{H} – удельный вес насыпей по объему:

$$\beta_{\text{H}} = \frac{1}{1 + 0,1323(V_{\text{III}} - 7,5)^{0,4364}} = \frac{V_{\text{H}}}{V_{\text{H}} + V_{\text{B}}}$$

Подставив (64), (65) в (63), получим

$$V_{\text{III}} = \frac{V_{\text{III}} \cdot L_{\text{УЛ}}}{1 + 0,1323(V_{\text{III}} - 7,5)^{0,4364}} \cdot \left[1 - \frac{3b(0,361 \cdot V_{\text{III}}^{0,74} - h_{\text{III}})^2 + 2m(0,361 \cdot V_{\text{III}}^{0,74} - h_{\text{III}})^3}{3b(0,361 \cdot V_{\text{III}}^{0,74})^2 + 2m(0,361 \cdot V_{\text{III}}^{0,74})^3} \right]. \quad (66)$$

Анализ выражения (59) для коэффициента K . При $b=6$ м; $m=1,5$; $h_{\text{III}}=1$ м, позволяет установить, что

$$K = \frac{3h_{\text{H}}^2 + 9h_{\text{H}} - 5}{h_{\text{H}}^3 + 6h_{\text{H}}^2}. \quad (67)$$

График функции $K = f(h_{\text{H}})$, построенный с учетом (67), представлен на рисунке 34. Там же представлен график линейной аппроксимации выражения (67), которая дает

$$K = 1 - 0,1h_{\text{H}}. \quad (68)$$

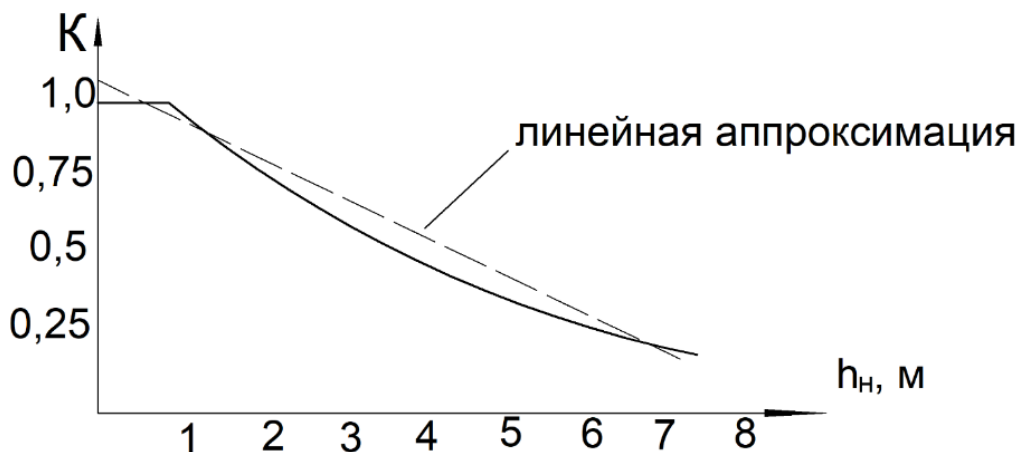


Рисунок 34 - График функции $K = f(h_H)$

Естественно, формулой (68) можно пользоваться в пределах допустимой точности аппроксимации, т.е. при $h_H \leq 8$ м.

Таким образом, для оценочных расчетов объема насыпей пониженного профиля можно, воспользоваться простыми выражением

$$V_{НПШ} \approx V_H (1 - 0,1h_H). \quad (69)$$

Алгоритм расчета организации сооружения земляного полотна на термопросадочных вечномерзлых грунтах. В основу алгоритма была положена методика расчета организации сооружения земляного полотна, изложенная в [2].

Остановимся коротко на основных положениях указанной методики.

Годовой цикл организации земляных работ на участке работы подразделения складывается из рабочего цикла и передислокации. Рабочий цикл в свою очередь делится на период разворачивания работ, период равномерной работы и период сворачивания работ. Ход разворачивания и сворачивания работ определяется соответствующим удельным временем τ_P и τ_C (порядка 0,015-0,030 мес/км). Тогда продолжительность периода равномерной работы

$$t_P = 12 - t_{ПД} - L_M \frac{\tau_P + \tau_C}{2}, \quad (70)$$

где: $t_{ПД}$ – время передислокации подразделения на новый участок работы, мес;

L_M – длина рабочего участка подразделения, км.

Принимая во внимание, что годовая потребная выработка подразделения $V_M = L \cdot \alpha \cdot V_{ПШ}$ (значение $\alpha \cdot V_{ПШ}$ приведено по 2-й группе трудности разработки), можно определить с учетом (70) в качестве показателя эффективности организации работ величину потребной среднемесячной выработки полностью развернутых производственных мощностей подразделения:

$$V_{MM}^{CP} = \frac{V_M}{t_P} = \frac{1}{\frac{12 - t_{ПД}}{V_M} - \frac{\tau_P + \tau_C}{2\alpha V_{ПШ}}}. \quad (71)$$

Вводя понятие коэффициента эффективности организации земляных работ $K_{\text{Э}}$ как первой частной производной V_{MM}^{CP} по $\alpha \cdot V_{III}$, уравнение (71) приведем к квадратному уравнению относительно V_M :

$$aV_M^2 - bV_M + c = 0, \quad (72)$$

где: a, b, c – коэффициенты:

$$a = K_{\text{Э}} \left(\frac{\tau_P + \tau_C}{2} \right)^2 + \left(\frac{\tau_P + \tau_C}{2} \right);$$

$$b = (12 - t_{III}) (\tau_P + \tau_C) \cdot \alpha V_{III} K_{\text{Э}};$$

$$c = (\alpha V_{III})^2 (12 - t_{III})^2 K_{\text{Э}}.$$

Решение уравнения (72) позволяет установить оптимальную при данных условиях (задаваемых значением $\alpha \cdot V_{III}$) и требуемом уровне эффективности (задаваемом значением $K_{\text{Э}}$) годовую выработку подразделения:

$$V_M = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (73)$$

Необходимая вооруженность подразделения $П_{KK}$ определяется отношением его годовой выработки V_M и годовой выработки V_{KK} на единицу вооруженности с учетом того, какой удельный вес δ земляных работ выполняется соответствующим видом вооруженности экскаваторами и другими машинами, т.е.

$$n_{KK} = \frac{V_M \cdot \delta}{V_{KK}}. \quad (74)$$

При этом в методике [2] для учета влияния факторов на V_{KK} разработана специальная модель, структура которой инвариантна по отношению к конкретному виду вооруженности.

Суть этой модели сводится к детальному выявлению целодневных потерь рабочего времени в году по праздничным дням t_{III} на передислокацию $t_{IIIД}$, в период распутицы $t_{IIIР}$, по метеоусловиям $t_{IIIМ}$ и по выходным дням $t_{IIIВ}$. Это позволяет с необходимой точностью определить общие целодневные потери рабочего времени в году и тем самым найти значение коэффициента целодневных потерь:

$$K_{цдп} = \frac{t_{III} + t_{IIIД} + t_{IIIР} + t_{IIIМ} + t_{IIIВ}}{365}. \quad (75)$$

Учет внутрисменных потерь, обусловленных нестабильностью и несбалансированностью производственного процесса, осуществляется с помощью специального коэффициента K_{BC} , величина которого в настоящих условиях достигает 0,85-0,87 для экскаваторов и 0,90-0,92 для бульдозеров и скреперов.

Потери рабочего времени на перебазировки машин с объекта на объект (коэффициент K_1), ремонты и техническое обслуживание (коэффициент K_2) выражаются снижением часовой

производительности землеройной машины на единицу вооруженности Q_{KK} полученной по ГЭСН в $1+t_{CM} \cdot K_{CM} (K_1 + K_2)$ раз.

Таким образом, в результате проведенного анализа получаем выражение для фактической годовой выработки на единицу вооруженности подразделения с учетом целодневных и нецелодневных потерь рабочего времени:

$$V = 365 t_{CM} K_{CM} (1 - K_{ЦП}) K_{ВС} \frac{Q_{KK}}{1 + t_{CM} K_{CM} (K_1 + K_2)}. \quad (76)$$

Поскольку наиболее распространенными в настоящее время являются экскаваторы с ковшем вместимостью 1 м^3 и самоходные скреперы со средней вместимостью ковша примерно $9,0 \text{ м}^3$, то используя данные, получаем, что часовая производительность представительного экскаватора составляет $70 \text{ м}^3/\text{ч}$, а скрепера, при средней дальности транспортирования грунта 300 м - $36 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Пересчитывая на единицу вооруженности получим:

- для экскаватора

$$Q_{KK}^э = \frac{70}{1} = 70 \text{ м}^3/\text{ч}, \text{ ковш. ч.},$$

- для скрепера

$$Q_{KK}^с = \frac{36}{9} = 4 \text{ м}^3/\text{ч}, \text{ ковш. ч.}$$

В современных условиях в пересчете на основной объем земляных работ на долю экскаваторных комплексов приходится 84% , скреперных - 16% , общего объема работ по сооружению земляного полотна. Поэтому при расчетах в формуле (74) можно полагать $\delta^э=0,84$, $\delta^с=0,16$.

Средние значения коэффициента сменности K_{CM} для любого вида землеройной техники в настоящее время лежат в границах от 1 до 2. При расчетах следует ориентироваться, как на наиболее распространенную, двухсменную работу. Продолжительность смены t_{CM} составляет при обычной пятидневной рабочей неделе 8 ч , а в случае использования вахтового метода - примерно $9,5 \text{ ч}$.

Что касается времени передислокации $t_{ПД}$, то эта величина зависит от климатических факторов, вооруженности подразделения и пр. В расчетах можно принимать

$$t_{ПД} = 0,7 \div 3,0 \text{ мес.}$$

Коэффициенты K_1 и K_2 в уравнении (76), как показывает проведенный анализ, для представительного экскаватора имеют следующие значения:

$$K_1 = 0,01 \text{ дн/ч}; K_2 = 0,02 \text{ дн/ч},$$

а для представительного скрепера:

$$K_1 = 0,0017 \text{ дн/ч}; K_2 = 0,012 \text{ дн/ч}.$$

Срок занятости $t_{ЗР}$ подразделения на участке L_M и необходимая численность работающих в подразделении соответственно равны:

$$t_{3P} = 12 - t_{ПД}, \quad (77)$$

$$n_{Л} = d + g \cdot n_{КК}, \quad (78)$$

где: d, g – некоторые постоянные коэффициенты.

На основании всех полученных и приведенных здесь аналитических соотношений предлагается расчет организации двухэтапной последовательности сооружения железнодорожного земляного полотна на термопросадочных грунтах, разработанный с применением системы *Mathcad*.

8.2. Пример решения

С применением системы *Mathcad* произведен расчет организации работ по сооружению земляного полотна на термопросадочных вечномёрзлых грунтах (рисунки 35-37). Исходные данные для расчета приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Исходные данные

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$h_{НПП}$	1	$n_{ДРД}$	120
B	6	$n_{ДВС}$	0
T	1,5	$n_{ДВО}$	0
τ_p	0,025	$n_{ДВ}$	0
τ_c	0,025	$Q_{КК}^Э$	70
$t_{ПД}$	1	$t_{СМ}$	9,5
A	0,8	K_1	0,01
$K_Э$	-0,15	K_2	0,02
Режим	вахта	$K_{ВС}$	0,85
$n_{ДП}$	10	$K_{СМ}$	2
$n_{ДПМ}$	20	$\delta^Э$	1,0
n'	3	$\delta^С$	0,0
$n_{ДПД}$	30,5	$Д$	64,18
$n_{НЕД}$	52	$Е$	18,59

Расчет организации сооружения земляного полотна на термопросадочных вечномёрзлых грунтах

1) Исходные данные

$h_{\text{нпп}} := 1$ - высота насыпи пониженного профиля, м

$b := 6$ - ширина основной площадки насыпи, м

$m := 1.5$ - показатель крутизны откоса насыпи

$\tau_p := 0.025$ - удельное время разворачивания земляных работ, мес/км

$\tau_c := 0.025$ - удельное время сворачивания земляных работ, мес/км

$t_{\text{пд}} := 1$ - время передислокации, мес

$\alpha := 0.8$ - отношение покิโลметрового рабочего объема земляных работ к профильному

$K_z := -0.15$ - коэффициент эффективности организации земляных работ

Режим - вахта

$n_{\text{дп}} := 10$ - число праздничных дней в году, дн

$n_{\text{дпм}} := 20$ - годовое число дней простоя по метеоусловиям, дн

$n' := 3$ - число совмещенных праздничных дней и дней простоя по метеоусловиям, дн

$n_{\text{дпд}} := 30.5$ - число дней на передислокацию подразделения на новый участок, дн

$n_{\text{нсд}} := 52$ - число недель в году, нед

$n_{\text{дрд}} := 120$ - годовое число дней распутицы, дн

$n_{\text{двс}} := 0$ - число совместных выходных дней в неделе, дн

$n_{\text{дво}} := 0$ - число совместных выходных дней в неделе, дн

$n_{\text{дв}} := 0$ - число выходных дней в неделе, дн

Рисунок 35 - Документ *Mathcad* с расчетом организации работ по сооружению земляного полотна на термопросадочных вечномёрзлых грунтах в *Mathcad*. Блок «Исходные данные» (начало)

$Q_{\text{Экк}} := 70$	- часовая производительность экскаватора на единицу вооруженности, м ³ /ч-к. ковш
$t_{\text{см}} := 9.5$	- часовая производительность экскаватора на единицу вооруженности, м ³ /ч-к. ковш
$K_1 := 0.01$	- число календарных дней на перебазировки машин с объекта на объект, приходящееся на 1 ч работы машины, дн/ч
$K_2 := 0.02$	- число календарных дней на перебазировки машин с объекта на объект, приходящееся на 1 ч работы машины, дн/ч
$K_{\text{вс}} := 0.85$	- коэффициент внутрисменных потерь рабочего времени, см
$K_{\text{см}} := 2$	- коэффициент сменности, см/день
$\delta := 1.0$	- удельный вес земляных работ, выполняемых экскаваторами в общем объеме
$D := 64.18$	- постоянный коэффициент
$E := 18.59$	- постоянный коэффициент
$L_{\text{ул}} := 30$	- протяженность участка линии, км
$V_{\text{шт}} := 20$	- объем покилометровый профильный, тыс. м ³

Рисунок 35 – Документ *Mathcad* с расчетом организации работ по сооружению земляного полотна на термопросадочных вечномерзлых грунтах в *Mathcad*. Блок «Исходные данные»
(окончание)

2) Блок решения

$$\beta := \frac{1}{1 + 0.1323 \cdot (V_{\text{пп}} - 7.5)^{0.4364}} \quad \text{- определение удельного веса насыпей по объему}$$

$$V_{\text{н}} := 20 \cdot \beta \cdot L_{\text{ул}} \quad \text{- определение объема насыпей на линии}$$

$$V_{\text{в}} := V_{\text{пп}} \cdot L_{\text{ул}} - V_{\text{н}} \quad \text{- определение объема выемок на линии}$$

$$h_{\text{н}} := 0.361 \cdot V_{\text{пп}}^{0.74} \quad \text{- определение представительной высоты насыпи}$$

$$V_{\text{нпп}} := V_{\text{н}} \cdot \left[1 - \frac{3 \cdot b \cdot (h_{\text{н}} - h_{\text{нпп}})^2 + 2 \cdot m \cdot (h_{\text{н}} - h_{\text{нпп}})^3}{3 \cdot b \cdot h_{\text{н}}^2 + 2 \cdot m \cdot h_{\text{н}}^3} \right] \quad \text{- определение высоты насыпи пониженного профиля}$$

$$V_{\text{пп}}^{\text{с}} := \frac{V_{\text{нпп}} + V_{\text{в}}}{L_{\text{ул}}} \quad \text{- определение суммарного объема насыпей пониженного профиля и выемок приходящегося на 1 км линии}$$

$$V_{\text{остн}} := V_{\text{н}} - V_{\text{нпп}} \quad \text{- определение остаточного объема насыпей на линии (без учета насыпей пониженного профиля)}$$

$$a_1 := K_3 \cdot \left(\frac{\tau_p + \tau_c}{2} \right)^2 + \left(\frac{\tau_p + \tau_c}{2} \right) \quad \text{- определение коэффициента}$$

$$a_2 := (12 - t_{\text{пд}}) \cdot (\tau_p + \tau_c) \cdot \alpha \cdot V_{\text{пп}} \cdot K_3 \quad \text{- определение коэффициента}$$

$$a_3 := (\alpha \cdot V_{\text{пп}})^2 \cdot (12 - t_{\text{пд}})^2 \cdot K_3 \quad \text{- определение коэффициента}$$

$$V_{\text{м}} := \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 - 4a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} \quad \text{- определение годовой выработки подразделения}$$

$$L_{\text{м}} := \frac{V_{\text{м}}}{\alpha \cdot V_{\text{пп}}} \quad \text{- определение длины рабочего участка подразделения}$$

$$n_{\text{м}} := \text{ceil} \left[\left(\frac{L_{\text{ул}}}{L_{\text{м}}} \right)^{0.6} \right] \quad \text{- определение необходимого числа подразделений, ведущих земляные работы}$$

Рисунок 36 – Документ *Mathcad* с расчетом организации работ по сооружению земляного полотна на термопросадочных вечномёрзлых грунтах в *Mathcad*. Блок «Блок решения» (начало)

$$t_{пп} := n_{дп} \cdot \left(1 - \frac{n_{дп} \cdot n_{дпм}}{365^2} \right) - n' \quad \text{- определение целодневных потерь времени в году по праздничным дням}$$

$$t_{ппд} := n_{дпд} + 30.5 \cdot L_M \cdot \frac{\tau_p + \tau_c}{2} \quad \text{- определение целодневных потерь времени в году на передислокацию}$$

$$t_{пр} := n_{дрд} \cdot \left[1 - \frac{n_{нсд} \cdot n_{дрд} \cdot (2 \cdot n_{двс} + n_{дво})}{2 \cdot 365^2} \right] \quad \text{- определение срока занятости подразделения на участке в период распутицы}$$

$$t_{пм} := n_{дпм} \cdot \left[1 - \frac{n_{нсд} \cdot n_{дпм} \cdot (2 \cdot n_{двс} + n_{дво})}{2 \cdot 365^2} \right] \quad \text{- определение срока занятости подразделения на участке с учетом метеоусловий}$$

$$t_{пв} := n_{дв} \cdot \left[(n_{нсд}) - \left(\frac{n_{дпд}}{7} \right)^{0.11} - \left[\frac{30.5 \cdot L_M \cdot \left(\frac{\tau_p + \tau_c}{2} \right)^{-0.11}}{7} \right] \right] \quad \text{- определение срока занятости подразделения на участке по выходным дням}$$

$$K_{цдп} := \frac{t_{пп} + t_{ппд} + t_{пр} + t_{пм} + t_{пв}}{365} \quad \text{- определение коэффициента целодневных потерь}$$

$$V_{кк} := 365 \cdot t_{см} \cdot K_{см} \cdot (1 - K_{цдп}) \cdot K_{вс} \cdot \left[\frac{Q_{Экк}}{1 + t_{см} \cdot K_{см} \cdot (K_1 + K_2)} \right] \quad \text{- определение годовой выработки подразделения на единицу вооруженности}$$

$$n_{кк} := \frac{V_M \cdot \delta}{V_{кк} \cdot 0.001} \quad \text{- определение необходимой вооруженности подразделения}$$

$$N_{кк} := n_{кк} \cdot n_M \quad \text{- определение общей потребной вооруженности подразделений, ведущих земляные работы на участке}$$

$$t_{зр} := 12 - t_{пд} \quad \text{- определение срока занятости подразделения на участке}$$

$$n_{л} := Д + E \cdot n_{кк} \quad \text{- определение необходимой численности работающих в подразделении}$$

Рисунок 36 – Документ *Mathcad* с расчетом организации работ по сооружению земляного полена на термопросадочных вечномёрзлых грунтах в *Mathcad*. Блок «Блок решения» (окончание)

$\beta = 0.715$	- удельный вес насыпей по объему	
$V_H = 429.081$	- объем насыпей на линии	
$V_B = 170.919$	- объем выемок на линии	
$h_H = 3.31$	- высота насыпи	
$V_{Hпп} = 242.37$	- объем насыпей пониженного профиля на линии	
$V_{OCTH} = 186.71$	- остаточный объем насыпей на линии (без учета насыпей пониженного профиля)	
$V_{пп}^v = 13.78$	- суммарный объем насыпей пониженного профиля и выемок приходящийся на 1 км линии	
$a_1 = 0.025$	$a_2 = -0.909$	$a_3 = -2204.61$
$V_M = 279.8$	- годовая выработка подразделения	
$L_M = 25$	- длина рабочего участка подразделения	
$n_M = 2$	- необходимое число подразделений, ведущих земляные работы	
$t_{пп} = 7$	- целодневные потери времени в году по праздничным дням	
$t_{ппд} = 50$	- целодневные потери времени в году на передислокацию	
$t_{пр} = 120$	- срок занятости подразделения на участке в период распутицы	
$t_{пм} = 20$	- срок занятости подразделения на участке с учетом метеоусловий	
$t_{пв} = 0$	- срок занятости подразделения на участке по выходным дням	
$K_{цдп} = 0.539$	- коэффициент целодневных потерь	
$V_{кк} = 121083$	- годовая выработка подразделения на единицу вооруженности	
$n_{кк} = 2.3$	- необходимая вооруженность подразделения	
$N_{кк} = 4.6$	- общая потребная вооруженность подразделений, ведущих земляные работы на участке	
$t_{зр} = 11$	- срок занятости подразделения на участке	
$n_L = 107$	- необходимая численность работающих в подразделении	

Рисунок 37 – Документ *Mathcad* с расчетом организации работ по сооружению земляного полотна на термопросадочных вечномерзлых грунтах в *Mathcad*. Блок «Результаты решения»

Литература

1. Автоматизированное проектирование организации строительства железных дорог / Под ред. С. П. Першина. – М.: Транспорт, 1991. – 261 с.
2. Бакулин, С. Н. Организация работ по строительству земляного полотна на вечномёрзлых грунтах: Методические указания / С. Н. Бакулин, М. И. Иванов. – М.: МИИТ, 1985. – 19 с.
3. Кудрявцев, Е. М. Комплексная механизация строительства : Учебное издание / Е. М. Кудрявцев. – М.: Издательство АСВ , 2005. – 424 с.
4. Охорзин, В. А. Оптимизация экономических систем. Примеры и алгоритмы в среде Mathcad: Учеб. пособие / В. А. Охорзин. -М.: Финансы и статистика, 2005.-144 с : ил.
5. Полянский, А. В. Автоматизированное решение задач проектного управления железнодорожным строительством : учебное пособие / А. В. Полянский. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Мир науки", 2021. – 75 с. – ISBN 978-5-6045772-0-2. – EDN QUAQJM.
6. Полянский, А. В. Автоматизированное решение организационно-технологических задач железнодорожного строительства : учебное пособие / А. В. Полянский. – Москва : Мир науки, 2024. – 79 с. – ISBN 978-5-907891-46-3. – DOI 10.15862/47MNNPU24. – EDN RTPCSQ.
7. Полянский, А. В. Технология строительных процессов и возведения зданий и сооружений : краткий курс : учебное пособие для студентов специальностей 270115 "Экспертиза и управление недвижимостью" и 270204 "Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство" / А. В. Полянский ; Московский гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ), Каф. "Организация, технология и управление строительством". – Москва : Московский гос. ун-т путей сообщ., 2009. – 209 с. – EDN QNOGCM.
8. Симонов, К. В. Моделирование систем и процессов в железнодорожном строительстве : учебное пособие / К. В. Симонов, А. В. Полянский. – Москва : ООО "Издательство "Мир науки", 2025. – 97 с. – ISBN 978-5-908044-33-2. – DOI 10.15862/71MNNPU25. – EDN DPEHDM.
9. СП 131.13330.2025 «Актуализированная редакция СНиП 23-01-2003 «Строительная климатология», М., 2024. – 215 с..
10. Спиридонова, М. А. Решение задач климатологии железнодорожного строительства с применением системы *Mathcad*: Учеб. пособие / М. А. Спиридонова, А. В. Полянский. – М.: МГУПС (МИИТ), 2016. – 145 с.

Полянский Алексей Викторович

**Автоматизированное решение организационно-технологических задач
железнодорожного строительства
Часть 2**

Учебное пособие издано в авторской редакции

Сетевое издание

Ответственный за выпуск – Алимова Н.К.

Учебное издание

Системные требования:

операционная система Windows XP или новее, macOS 10.12 или новее, Linux.
Программное обеспечение для чтения файлов PDF.

Объем данных 3,3 Мб

Принято к публикации «11» марта 2026 года

Режим доступа: <https://izd-mn.com/PDF/15MNNPU26.pdf> свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.

ООО «Издательство «Мир науки»

«Publishing company «World of science», LLC

Адрес:

Юридический адрес – 127055, г. Москва, пер. Порядковый, д. 21, офис 401.

Почтовый адрес – 127055, г. Москва, пер. Порядковый, д. 21, офис 401.

<https://izd-mn.com/>

**ДАННОЕ ИЗДАНИЕ ПРЕДНАЗНАЧЕНО ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ
НА ЭЛЕКТРОННЫХ НОСИТЕЛЯХ**