1. Карьерный транспорт является одним из важнейших звеньев технологической цепи открытых горных разработок. На транспортирование горной массы затрачивается около половины стоимостных и трудовых ресурсов отрасли. С ростом глубины карьеров возрастает роль автомобильного транспорта, как наиболее гибкого и маневренного. Транспортная сеть в карьере является сложной системой, состоящей из значительного числа активных элементов - авто­самосвалов и экскаваторов. Эта система характеризуется быстрым изменением параметров транспортного потока в пространстве и во времени, а также случайными значениями времени протекания отдельных процессов. Оптимальное оперативное планирование и управление карьерным транспортом позволяет повысить его производительность более чем на 20% [5].

2. Данная статья является одним из этапов разработки автоматизированной системы управления горно-транспортными работами (АСУ ГТР) предназначенной для решения задач оперативного планирования и управления работой как традиционных, так и роботизированных транспортных средств.

3. Целью работы является повышение эффективности управления технологическим транспортом с учетом его текущего территориального распределения, состояния и загрузки путем использования имитационного моделирования транспортных процессов и прикладных информационных технологий планирования, прогнозирования и управления.

4. В работе [2] рассматривалось решение задачи автоматизированного управления и контроля роботизированными транспортными средствами при маневрах на площадках ограниченного размера, таких, как разгрузочные и перегрузочные площадки карьеров. Описываемая в данной статье имитационная модель интегрируется с системой контроля и маршрутизации роботизированных и традиционных транспортных средств, выполняющих маневры на разгрузочных и перегрузочных площадках.

5. Имитационная модель также предназначена для исследования эффективности различных вариантов оперативного управления горно-транспортными работами. Разработка моделей и алгоритмов планирования и оперативного управления горно-транспортными работами связана с многочисленными экспериментами, которые практически невозможно осуществить в натурных условиях. Необходимой частью автоматизированной системы управления как на стадии разработки и отладки, так и на стадии внедрения и эксплуатации является имитационная модель, позволяющая в ускоренном масштабе времени воспроизвести различные режимы работы транспортного комплекса, оценить качество планирования и управления.

6. Метод имитационного моделирования впервые был применен для решения задач организации производственных процессов в карьере в работе [3]. История дальнейшего развития имитационного моделирования в горном деле изложена в [4].

7. Разработанная имитационная модель базируется на принципах: агрегативности, то есть горно-транспортный комплекс рассматривается как совокупность относительно обособленных агрегатов (самосвалов, экскаваторов, пунктов контроля и управления) с четко определенными функциями, событийности – состояние системы рассматривается моделью только в «критические» моменты времени, то есть когда в системе происходят те или иные изменения.

8. Описываемая имитационная модель является управляемой. Это означает, что в её работу можно вмешаться и внести коррективы, так, как это делает диспетчер ГТР, принимающий решения о смене заданий для отдельных автосамосвалов на основе анализа текущей ситуации и выбранных критериев качества транспортного процесса.

## Определение закономерностей функционирования исследуемой производственной системы

9. Процесс транспортирования горной массы на открытых горных разработках включает перемещение вскрышных пород и руд от погрузочного оборудования, расположенного внутри карьера, пункты разгрузки (перегрузочный пункт, бункер дробильной установки, отвал). Для карьерного автотранспорта характерны небольшие расстояния перевозок (от 1,5 до 5 км), постоянные маршруты движения по дорогам с переменным продольным профилем и значительным числом поворотов.

10 Транспортный цикл при работе автосамосвалов в карьере включает следующие операции: погрузку горной массы в самосвал, движение с грузом, маневры в пункте разгрузки, разгрузку, возвращение автосамосвала порожняком и маневры перед очередной погрузкой. В транспортном цикле наибольший удельный вес составляет время движения автосамосвала в груженом и порожнем состоянии. Продолжительность погрузки автосамосвала зависит от модели и вместимости ковша экскаватора, характера разрабатываемого грунта и параметров забоя, схемы подъезда под погрузку, грузоподъемности автосамосвала, угла поворота экскаватора при погрузке и других факторов.

11. При сравнительно небольшом числе автосамосвалов, работаю­щих в карьере (15—20 шт.), они закрепляются на смену за экска­ваторами. При такой системе организации работ, носящей название закрытого цикла, могут возникать неизбежные простои экскавато­ров или автосамосвалов вследствие неисправности одного из этих механизмов или задержки автосамосвалов.

12. При большем числе автосамосвалов и экскаваторов возникают простои экскаваторов из-за недостатка автосамосвалов, вызванного поломками, задержками в пути и при разгрузке. Для более полного использования экскаваторов и автомобилей на многих предприяти­ях применяется распределение автомобилей под экскаваторы в про­цессе работы. Диспетчер карьера, пользуясь световым табло или радиостанцией, направляет автомобили туда, где они могут быть в данный момент быстрее загружены. Диспетчерский пункт обору­дован с таким расчетом, чтобы в пределах видимости диспетчера находился весь карьер. На дорогах карьера установлена световая сигнализация. На ней высвечивается номер свободного экскавато­ра, к которому диспетчер направляет автосамосвал. Такая система оперативного распределения автосамосвалов в карьере, носящая наименование работы по открытому циклу, повышает производи­тельность работы погрузочно-транспортного оборудования за счет сокращения простоев.

13. Усредненные временные параметры транспортного цикла для одного из карьеров приведены в таблице (автосамосвал БелАЗ-7519).

Таблица 1. Продолжительность операций транспортного цикла в с.

|  |  |
| --- | --- |
| О п е р а ц и и | В р е м я, с |
| Ожидание погрузки | 105,0 |
| Маневрирование при установке под погрузку | 41,0 |
| Погрузка | 210,0 |
| Транспортировка горной массы: | 800,7 |
| Движение порожнего на спуск | 236,3 |
| Движение груженого на подъём | 420,0 |
| Установившееся движение | 144,4 |
| Ожидание разгрузки | 10,0 |
| Маневрирование при установке на разгрузку | 44,1 |
| Разгрузка | 50,0 |
| Продолжительность транспортного цикла | 1259,4 |

#### Принципы построения модели и формализация моделируемой

#### системы

14. Состояние транспортного комплекса как системы в любой момент времени можно рассматривать как вектор состояний составляющих элементов. Задачей моделирования является построение последовательности этих состояний с учетом начальных условий.

15. В основу модели положен принцип «особых состояний», заклю­чающийся в том, что контроль модели происходит только в те моменты времени, когда изменяется состояние какого-либо элемента (происходит событие). В соответствии с заданным алгоритмом в этот момент вре­мени происходит корректирование состояния элемента и анализ мо­дели в новом состоянии. Преимущество указанного способа заключается в значительном сокращении времени работы машинной программы, а также то, что события рассматриваются как одновременные только в том случае, если состояние соответствующих элементов изменяется в одном цикле пересчета модели.

16 В качестве основных рабочих параметров модели приняты следующие величины:

Количество экскаваторов (1…10);

Диапазон вместимости ковша экскаватора, м3 (4…22);

Количество пунктов разгрузки (1…10);

Количество автосамосвалов (1…40);

Диапазон грузоподъёмности автосамосвалов, т (40…180);

Диапазон скоростей движения автосамосвалов, км/ч (0…40);

Коэффициент использования машинного времени экскаваторов, %;

Коэффициент использования машинного времени автосамосвалов %;

Средняя длина очереди автосамосвалов к экскаватору, шт;

Максимальная длина очереди автосамосвалов к экскаватору, шт;

Производительность карьера, т/ч.

17. Относительная производительность карьера (текущая производительность, отнесенная к теоретической производительности, при которой экскаваторы и автосамосвалы работают без простоев), %.

###### 18 Кроме того, должны быть заданы:

Матрица закрепления автосамосвалов за экскаваторами;

Матрица закрепления автосамосвалов за пунктами разгрузки;

Матрица смежности графа транспортной сети карьера;

19 Основным рабочим элементом модели является автосамосвал. В модели рассматриваются следующие состояния автосамосвала в карьере:

- движение в порожнем состоянии;

- ожидание в пункте погрузки;

- маневры в пункте погрузки;

- погрузка;

- движение к пункту учета и управления (открытый цикл);

- движение в груженом состоянии;

- ожидание в пункте разгрузки;

- маневры в пункте разгрузки;

- разгрузка;

20 Длительность каждой перечисленной операции в общем случае является случайной величиной. Для повышения адекватности модели кроме основных временных интервалов (времена движения, погрузки, разгрузки и нахождения автосамосвала в очередях) в ней учтены простои на поворотах для выбора безопасной дистанции при въезде в транспортный поток, задержки при снижении скорости на кривых или при соблюдении безопасной дистанции следования с учетом плотности потока машин. Анализ гистограмм, полученных в результате наблюдения за работой автосамосвалов в карьере, позволяет принять в большинстве случаев нормальный и пуассоновский законы распределения длительностей рассмотренных операций.

21. Вектор параметров каждого автосамосвала содержит номер i (i=1…N), грузоподъемность, принадлежность к определенному маршруту m, загруженность *li* (*li*=1 – без груза, *li*=2 – с грузом), дислокацию Zi, текущую скорость и направление движения, продолжительность нахождения автосамосвала в работе.

22. Множество технологически возможных маршрутов движения, автосамосвалов в карьере у(k,j) от k-го пункта погрузки к j-му пункту разгрузки можно выразить через совокупность последовательностей вершин графа Вm = {Zm**1**, Zm**2**,…Zm**b-1**, Zm**b**} где b - число вершин на маршруте m. Таким образом Zm**1∈Р,** Zm**b∈R** и {Zm**2**..Zm**b-1**,}∈{Q∪D} где Р – множество пунктов погрузки, R – множество пунктов разгрузки, Q – множество пунктов промежуточных транспортных задержек и D - пункт управления. Каждая дуга K**kj** графа соответствует элементарному участку транспортной сети карьера и характеризуется протяженностью L**ki** и уклоном U**ij**. Математическая запись графа транспортной сети карьера имеет вид

G = (K, B), (1)

где К – матрица смежности графа маршрутов;**,** М – число допустимых маршрутов.

23. Граф G должен быть односвязным. Вершинам графа Р, R, D в модели ставится в соответствие четыре величины: *τ1l,τ2l,τ3l,τ4l .* Для пунктов погрузки, разгрузки и управления *τ1l* и *τ2l* означает время поступления автосамосвалов на указанные пункты и начало выполнения соответствующих видов работ. Величины *τ3l,τ4l* означают время окончания работы и время отбытия автосамосвала. Применение данных величин позволяет однозначно определить процесс формирования транспортного потока и распределение автосамосвалов при их движении по транспортной сети.

24. Таким образом, описание транспортной сети карьера с помощью ориентированного графа позволяет в удобном для моделирования виде задавать маршруты движения автосамосвалов в карьере.

###### Описание алгоритма имитационного моделирования

25. Имитационная модель работы автотранспорта в карьере для удобства может быть разбита на подсистемы, цели функционирования которых подчинены цели функционирования всей системы. Процесс работы автотранспорта в карьере может быть разделен на следующие основные подсистемы: 1- погрузка, 2- транспортировка, 3 - разгрузка. С учетом вышесказанного в описании данной модели может быть применен блочный принцип.

26. Укрупненная блок-схема алгоритма имитационной модели работы автотранспорта в карьере представлена на рис.1.

Блок 2. Служит для ввода данных, характеризующих транспортную сеть и погрузочно-транспортное оборудование.

Блок 3. Задаются начальное и конечное события – фиксация модельного времени.

Блок 4. Работа блока состоит в нахождении ближайшего по времени модельного события si. В параметры события входят дислокация автосамосвала, погрузка, разгрузка, изменение направления движения.

Блок 5. Фиксируется время наступления события для формирования протокола работы модели.

Блок 6. Проверяется условие ti≥Тмод, которое означает конец моделирования. В этом случае управление передается блоку 11.

Блок 7. Учитывается местоположение автосамосвала и определяется выполняемая им операция (разгрузка, погрузка, движение по участку трассы, проезд через примыкание автодорог, получение адреса экскаватора при работе автосамосвала по открытому циклу) и т.п.

Блок 8. Объекту присваивается новое состояние, которое должно повлечь наступление нового события через заданное время.

Блоки 9 и 10 осуществляют интерфейс с системой оперативного управления, в которой фактически и производится анализ состояния модели. Анализ состояния модели может происходить по различным критериям в зависимости от цели проводимого эксперимента. Система оперативного управления должна принимать решение о направлении конкретного автосамосвала к конкретному месту разгрузки или о перераспределении автосамосвалов между забоями.

Блок 11. По окончании процесса моделирования формируется протокол, отражающий динамику событий и изменение контрольных параметров.

На рис.2 показана укрупненная схема алгоритма моделирования работы отдельного автосамосвала.

Блок 2. Инициализация объекта заключается в присваивании ему конкретных значений вектора параметров (дислокация, закрепление за маршрутом, скорость, текущая операция). С учетом правил поддержки безопасного расстояния между автосамосвалами определяется начало работы каждого автосамосвала по формуле:

 при условии , (2)

где N - количество автосамосвалов в модели; tбез – время, полученное из условия безопасности расстояния и максимально возможной скорости движения автосамосвалов в транспортном потоке; *r* - равномерно распределенная случайная величина на интервале 0…1.

Блок 3. С учетом направления движения и выделенной дуги графа транспортной сети определяется время *τi* его движения по элементарному участку трассы. Время движения в груженом состоянии (мин) определяется по формуле [5]

 , (3)

где *Sгр* - длина отдельных участков дороги в грузовом направлении, км; *kc* - 0,75..0.9 - коэффициент снижения скорости по различным причинам; *vгр*- техническая скорость движения автомобиля по отдельным участкам дороги в груженом состоянии, км/ч.

Время движения в порожнем состоянии определяется аналогично по формуле

 , (4)

где *Sпор* - длина отдельных участков дороги для порожнего состояния, км; *vпор* - техническая скорость движения автомобиля по отдельным участкам дороги в порожнем состоянии, км/ч;

27. Допустимая техническая скорость движения автомобиля (км/ч) в любом направлении с учетом правил безопасного движения в карьере не должна превышать скорость движения, рассчитанную по условию торможения по формуле [6]

 , (5)

где аз - замедление автомобиля при торможении, м/с2; S - заданный остановочный путь, м; tСТ - время срабатывания тормозной системы, с.

Замедление автомобиля при торможении аз (м/с2) можно определить по формуле [6]

 , (6)

где *Ксц= mс/mа* - коэффициент сцепной массы; *mс* - сцепная масса автомобиля, т; *mа* - масса автомобиля, т; ω0 - основное удельное сопротивление, н/т; i - уклон автодороги, %; γ - коэффициент, учитывающий энергию вращающихся масс; Ψ-коэффициент сцепления. После определения средних значений указанных физических параметров для карьерных автосамосвалов (Белаз-7519, Белаз-7521, ND-1200), был определен диапазон замедлений аз= (0,5…1,75) м/с2, из которого конкретные значения выбираются случайным образом.

Блок 4 определяет момент смены состояния объекта.

Блок 5 изменяет состояние объекта согласно алгоритму его функционирования (остановка, маневры и т.п.).

Блок 6 учитывает правила безопасного движения автосамосвала в транспортном потоке. Интервал следования машин S, м должен быть больше *lбез* м, которое определяется по формуле [7]

 , (7)

где Δ - допустимое расстояние между автосамосвалами при их остановке, м; *tpв* – время реакции водителя, с; tСТ – время срабатывания тормозной системы, с; *vн* - скорость движения автосамосвала, км/ч; S*д* - длина действительного тормозного пути, м.

28. Кроме того, в блоке 6 генерируется значение времени на маневрирование автосамосвала при погрузке или разгрузке, определяется продолжительность простоя автосамосвала в очереди на погрузку или разгрузку, а также формируется время его погрузки или разгрузки.

Блок 7 и Блок 8 являются частью общего алгоритма и отслеживают модельное время.

Блок 9 фиксирует конечное состояние объекта.

29. Для получения достоверных данных при использовании предложенной имитационной модели необходимо осуществлять многократный прогон программы на ЭВМ. Чтобы учесть переходные процессы, возникающие в начале и конце смены, когда количество задействованных машин растет или убывает, необходимо устанавливать длину реализации модели равной одной смене.

30. Оптимальное число прогонов модели определяется методом последовательных испытаний [8]. При использовании этого метода объем выборки Nв, для оценки математического ожидания исследуемого параметра заранее не фиксируется, а определяется на основе информации, полученной по определенному количеству предварительных реализаций модели N0 (обычно равном 40..50). По предварительным реализациям определяют σх2 – выборочную дисперсию. Тогда требуемое количество реализаций при заданном уровне доверия *р* и точности *ε* равно

 . (8)

На практике в обычных исследованиях принимают р =0,95, ему соответствует значение квантиля *Uа* = 1,96. ε - длина доверительного интервала оцениваемого параметра.

###### Проверка адекватности модели

31. Под адекватностью имитационной модели понимается соответствие реакций модели реакциям реальной системы при заданной совокупности свойств системы, учтенных в модели. Для проверки адекватности имитационной модели производились испытания модели по описанной выше методике. Для сравнения были взяты статистические производственные показатели одного из ГОКов Украины. Усредненные результаты испытаний приведены в таблице 2.

32. Программная реализация модели выполнена на универсальном языке программирования. Это позволяет использовать стандартные средства ввода-вывода и редактирования информации, в том числе построения графиков и анимации, библиотеки подпрограмм численных методов и статистического анализа, позволяет встраивать модель в контур любого алгоритма оптимизации, свободно выбирать определяемые показатели.

##### **Выводы**

33. Разработана и испытана управляемая имитационная модель работы технологического автотранспорта в железорудных карьерах, позволяющая оценить эффективность моделей планирования и оперативного управления работой традиционного и роботизированного карьерного автотранспорта. Программа позволяет задавать граф маршрутов, и затем следить за работой транспорта в течение смены. Визуальный интерфейс ввода маршрутов, параметров моделирования и отображения движения транспортных средств обеспечивает простоту использования и наглядность.