

ГОРНОЕ



МАШИНОСТРОЕНИЕ

В.И. ГАЛКИН

Е.Е. ШЕШКО

ТРАНСПОРТНЫЕ МАШИНЫ

*Допущено Учебно-методическим объединением
вузов Российской Федерации по образованию
в области горного дела в качестве учебника
для студентов вузов, обучающихся по специальности
«Горные машины и оборудование» направления
подготовки «Технологические машины
и оборудование»*



МОСКВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ГОРНАЯ КНИГА»

**ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

2010

УДК 622.68.002.5(075.8)
ББК 39.9
Г 16

Издано при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям в рамках Федеральной целевой программы «Культура России»

Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых» СанПиН 1.2.1253—03, утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г. (ОСТ 29.124—94). Санитарно-эпидемиологическое заключение Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 77.99.60.953.Д.014367.12.09

Экспертиза проведена Учебно-методическим объединением высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области горного дела (письмо №51-34/6 от 10.04.2008)

Рецензенты:

- кафедра «Горные машины и горная электромеханика» Московского государственного открытого университета (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. Ю.Д. Красников);
- д-р техн. наук, проф. Ю.А. Яхонтов (Российский государственный геологоразведочный университет)

Галкин В.И., Шешко Е.Е.

Г 16 Транспортные машины: Учебник для вузов. — М.: Издательство «Горная книга», Издательство МГГУ, 2010. — 588 с.: ил. — (ГОРНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ)

ISBN 978-5-98672-206-1 (в пер.)

ISBN 978-5-7418-0645-6

Рассмотрены вопросы теории, расчета и выбора параметров транспортного оборудования, используемого на подземных и открытых горных предприятиях. Описаны конструкции современных высокопроизводительных транспортных машин цикличного и непрерывного действия. Уделено внимание вопросам перегрузки с одного вида транспорта на другой и механическому оборудованию, применяемому на перегрузочных комплексах. Рассмотрены достижения отечественной и мировой науки и техники в области транспортных машин.

В.И. Галкин — зав. кафедрой, д-р техн. наук, профессор; *Е.Е. Шешко* — канд. техн. наук, профессор (кафедра «Горная механика и транспорт» Московского государственного горного университета).

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Горные машины и оборудование» направления подготовки «Технологические машины и оборудование».

УДК 622.68.002.5(075.8)
ББК 39.9

ISBN 978-5-98672-206-1
ISBN 978-5-7418-0645-6



- © В.И. Галкин, Е.Е. Шешко, 2010
- © Издательство «Горная книга», 2010
- © Издательство МГГУ, 2010
- © Дизайн книги. Издательство МГГУ, 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

Возрастающие из года в год потребности промышленных предприятий в минеральном сырье могут быть реализованы за счет модернизации и технического перевооружения горных предприятий, широкого внедрения комплексной механизации и автоматизации производственных процессов при концентрации и интенсификации ведения горных работ.

Добыча полезного ископаемого и его транспортирование до места отгрузки потребителю или переработки — основные процессы в технологии добычи полезного ископаемого, в связи с чем возрастают требования к транспортным машинам, являющимся неотъемлемой частью в цепи технологического процесса.

Транспортные машины, работающие в горной промышленности, должны иметь высокую производительность, надежность, энерговооруженность и долговечность, обеспечивать бесперебойное перемещение полезного ископаемого на значительные расстояния.

На долю транспортной составляющей в себестоимости добычи полезного ископаемого в среднем приходится 50 % (в глубоких карьерах превышает 70 %). В связи с этим уменьшение энергоемкости транспортирования, а также негативного воздействия транспорта на окружающую среду за счет применения инновационных разработок на стадиях проектирования и изготовления транспортных машин нового технического уровня позволяет снизить себестоимость транспортирования и повысить безопасность эксплуатации.

Этим объясняется исключительно важная роль, которая принадлежит транспорту в горном производстве, а курсу «Транспортные машины» — в системе подготовки горных инженеров-механиков.

Цель изучения курса «Транспортные машины» — получение знаний в области теории, расчета и эксплуатации транспортных машин и комплексов горных предприятий (открытых и подземных), без которых невозможно эффективное применение современных высокопроизводительных транспортных средств и принятие обоснованных технических решений.

В учебнике изложены последние достижения отечественной и мировой науки в области теории и расчета горно-транспортных машин.

Основоположником курса по изучению транспорта на горных предприятиях является академик А.М. Терпигорев, опубликовавший в 1901 г. книгу «Доставка». Впоследствии школу отечественного горного транспорта возглавили чл.-корр. АН СССР А.О. Спиваковский и акад. АН УССР Н.С. Поляков.

В развитие теории транспортных машин для горных предприятий внесли большой вклад такие крупные ученые, как доктора технических наук, профессора А.В. Андреев, М.В. Васильев, А.В. Евневич, Б.Н. Кузнецов, М.Г. Потапов, А.А. Ренгевич, Г.И. Солод, Н.В. Тихонов, Б.В. Фадеев, Л.Г. Шахмейстер, Л.И. Чугреев, И.Г. Штокман, А.А. Кулешов, В.Г. Дмитриев, кандидаты технических наук, профессора И.В. Запенин, В.А. Дьяков, Ю.С. Пухов, кандидат технических наук М.А. Котов и многие другие.

Авторы выражают глубокую признательность и благодарность кафедре «Горные машины и горная электромеханика», заведующему кафедрой, д-ру техн. наук, проф. Ю.Д. Красникову (Московский государственный открытый университет) и д-ру техн. наук, проф. кафедры «Механизация и автоматизация горных и геологоразведочных работ» Ю.А. Яхонтову (Российский государственный геологоразведочный университет) за большой труд по рецензированию книги и ценные замечания.

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГОРНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КАРЬЕРНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИНАХ

1.1.1. Виды карьерных транспортных машин. Классификация транспортных машин

Карьерные транспортные машины предназначены для транспортирования полезного ископаемого и вскрышных пород, т.е. основных грузов на карьерах.

Наибольшее распространение получил железнодорожный, автомобильный и конвейерный транспорт, а также их комбинация. Применяются гидравлический транспорт, транспорт канатными подвесными дорогами, скиповые подъемные установки, кабельные краны.

К транспортным установкам относят также оборудование, используемое для механизации погрузочных, перегрузочных и разгрузочных работ (питатели, дозаторы, затворы и т.д.).

Вспомогательные грузы, т.е. оборудование, запасные части, горючесмазочные материалы, взрывчатые вещества и др., перевозятся автомобильным или железнодорожным транспортом.

Железнодорожный транспорт предназначен для карьеров, имеющих относительно большие размеры в плане и объемы перевозки от 20 до

150 млн т горной массы в год, глубину разработки до 250 м, расстояние транспортирования 5—15 км.

Автомобильный транспорт имеет широкую область применения на карьерах — от карьеров малой и средней производственной мощности (с грузооборотом до 15—20 млн т горной массы в год) при расстоянии транспортирования 1,5—3 км до крупных карьеров (70—100 млн т) при расстоянии транспортирования до 5 км (в отдельных случаях и более).

Конвейерный транспорт последнее время эффективно применяется как на мягких горных породах (при грузооборотах 50—60 млн т в год и более), так и на скальных породах (при грузооборотах 20—30 млн т в год) при расстоянии транспортирования 4—6 км (в отдельных случаях до 20 км).

Область эффективного применения различных видов транспорта весьма ориентировочная и в каждом конкретном случае рациональный вид (или комбинация видов) транспорта определяется экономической эффективностью и экологической целесообразностью различных вариантов.

Простота обслуживания достигается применением одного вида транспорта на карьере. Однако это не всегда эффективно. Поэтому для транспортирования вскрышных пород часто применяется один вид транспорта, а полезного ископаемого — другой. Более того, в соответствии с условиями эксплуатации каждый вид горной массы на всей длине трассы целесообразно в ряде случаев транспортировать не одним видом транспорта, а двумя (или даже несколькими) с перегрузкой. В этом случае транспорт называют комбинированным (автомобильно-железнодорожный, автомобильно-конвейерный, автомобильно-скиповой и т.д.).

Транспортные машины принято **классифицировать** по основному признаку — принципу действия. По этому принципу транспортные машины разделяются на машины непрерывного действия, перемещающие груз непрерывным потоком, и машины циклического действия, при работе которых четко выражен цикл работы, выполняемых последовательно операций: погрузка горной массы в машину, движение с грузом, разгрузка и движение без груза (порожняком) к месту погрузки (далее цикл повторяется).

К машинам непрерывного действия относятся конвейеры (всех типов), гидравлические транспортные установки, некоторые виды канатных дорог и т.д.

К машинам циклического действия относят железнодорожные составы, автомобили, скиповые подъемники, кабельные краны и т.д.

Карьерные транспортные машины имеют ряд особенностей по сравнению с промышленными машинами. Во-первых, пункты погрузки, а иногда и разгрузки постоянно изменяют свое положение, перемещаясь вслед за фронтом горных работ. Это вызывает необходимость периодиче-

ского перемещения транспортных коммуникаций (железнодорожных путей или автомобильных дорог) или оборудования (конвейерных ставов и др.), появляются временные передвижные коммуникации и оборудование, которые обуславливают дополнительные требования к работе машин на этих участках. Во-вторых, необходимость при разработке как глубинных, так и нагорных месторождений значительных уклонов трассы, которые обуславливают вид и тип транспортной машины, массу перевозимого груза, скорость движения и т.д.

В-третьих, карьерный транспорт, являясь промежуточным звеном между процессами выемки горной массы и ее переработки или складирования, определяет организационную и **параметрическую** взаимосвязь между предыдущим (выемкой) и последующим (переработка или складирование) технологическими процессами. Это означает, что смежные технологические процессы должны быть механизированы соответствующим друг другу оборудованием, удовлетворять условию комплектности механизации открытых горных работ.

Кроме того, эффективность, а иногда и возможность работы транспортной машины на карьере определяется свойствами перевозимого груза и параметрами трассы.

1.1.2. Генеральный план карьера.

Основные принципы его проектирования.

Обоснование расчетной трассы

Представление об условиях движения транспортной машины внутри карьера и на поверхности до конечных пунктов, которыми являются отвалы, дробильно-сортировочные и дробильно-обогащительные фабрики (ДСФ, ДОФ), склады и т.д., дает нам схема внутрикарьерных путей, определяемая технологическими особенностями разработки, и генеральный план поверхности карьера.

Генеральный план является масштабным ситуационным планом поверхности карьера.

На генеральный план наносят: координатную сетку, характеристику рельефа местности (отметки поверхности, водные бассейны, реки, леса и т.д.), границы месторождения и карьерного поля, отвалы, промышленные площадки с основными и вспомогательными зданиями и сооружениями, гражданские сооружения, гражданские и промышленные транспортные коммуникации (железные дороги, станции, рельсовые пути, автодороги и т.д.), подземные и наземные сооружения и элементы благоустройства территории (рис. 1.1).

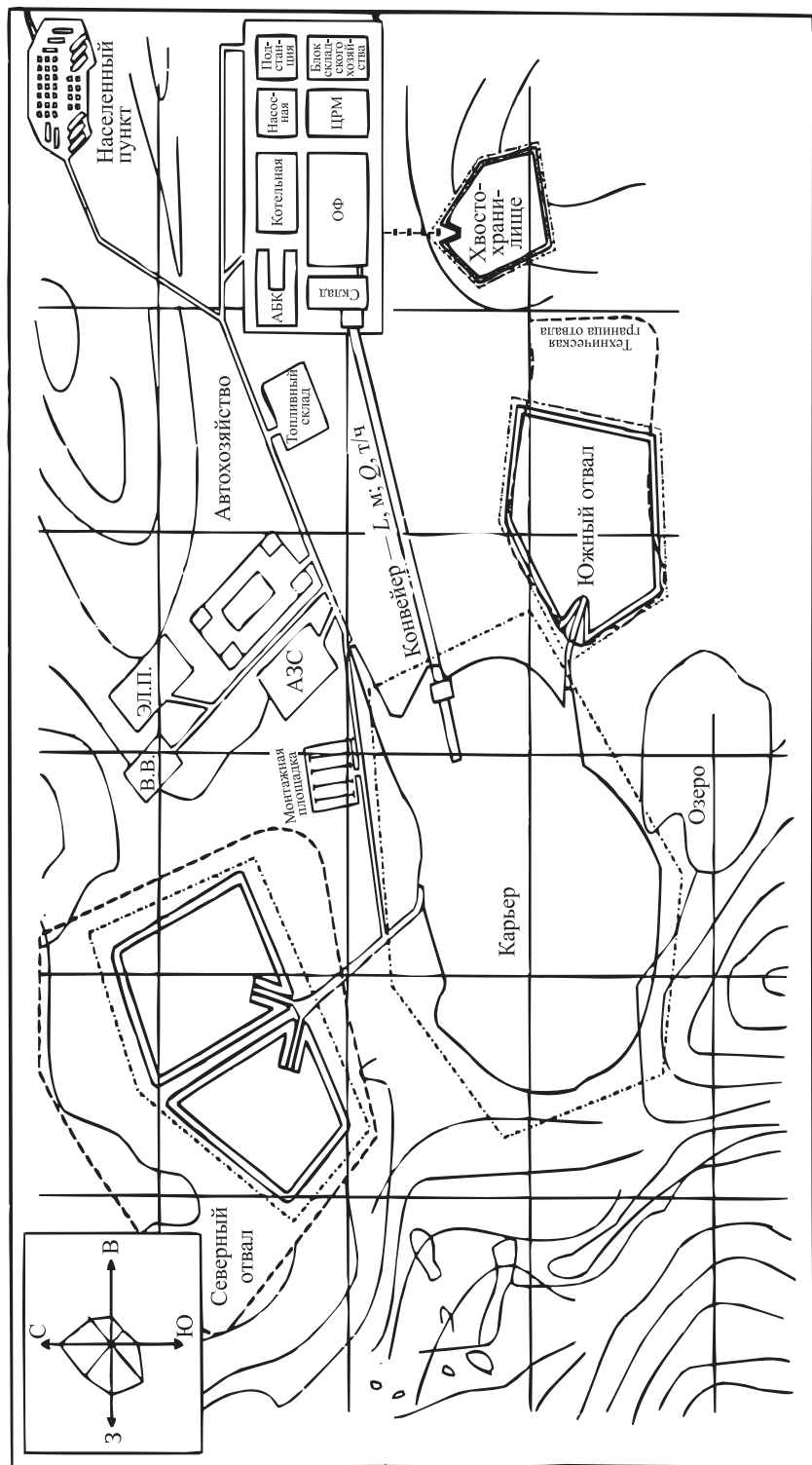


Рис. 1.1. Генеральный план поверхности карьера

Генеральные планы составляют в масштабе 1:10 000, 1:5000 или 1:2000 и ориентируют относительно стран света. На генеральном плане указывают розу ветров.

Роза ветров — график, изображающий режим ветра в данной местности (обычно строится по многолетним данным для месяца, сезона, года). На этом графике по 8 (или 16) румбам откладывают в выбранном масштабе в виде векторов значения повторяемости (% от общего числа наблюдений) направлений средних и максимальных скоростей ветра.

На размещение объектов поверхностного комплекса оказывают влияние технология ведения горных работ, кондиции и сортность полезного ископаемого, режим горных работ, производственная мощность карьера, рельеф местности, ценность земель и т.д.

Анализ проектных решений и фактических данных карьеров показал, что основными затратами, определяющими экономичность размещения объектов поверхности являются транспортные, величина которых достигает 70—80 %.

С этой точки зрения эффективным является максимальное приближение объектов к карьере, что ограничивается рядом факторов.

Во-первых, это положение предельных контуров карьеров, а также срок службы сооружений, так как в общем случае объекты поверхностного комплекса не следует располагать над залежами полезных ископаемых (кроме особо обоснованных случаев) и они должны быть удалены не менее чем на 300—500 м от участков взрывных работ.

Вместе с тем многие карьеры имеют значительный срок службы, контуры их приходят в конечное состояние через 25—30 лет или в связи с доразведкой месторождений и реконструкцией предприятия предельные контуры меняют свое положение (в сторону расширения) несколько раз в течение срока службы карьера.

В этом случае расположение объектов за пределами конечных контуров часто значительно увеличивает длину транспортирования, а приближение к карьере обуславливает последующий перенос их на новое место, следовательно, и дополнительные затраты. Анализ фактического размещения объектов на ряде предприятий показывает, что в некоторых случаях экономия от сокращения расстояния транспортирования в первые годы эксплуатации превышает затраты на перенос объектов.

Во-вторых, необходимо обеспечить минимальный объем земляных работ при проведении транспортных коммуникаций, планировании промышленных площадок и других объектов.

При выборе строительной площадки карьера необходимо учитывать, что рельеф местности должен быть ровным, уклон к границам площадки не должен превышать 10 %. Грунты должны быть устойчивыми

(соответствовать нагрузкам проектируемых сооружений), уровень грунтовых вод должен быть низким, исключаям устройство специальных сооружений и проведение сложных дренажных и гидроизоляционных работ. Площадка не должна затопляться паводковыми водами.

В-третьих, следует учитывать ориентацию элементов поверхностного комплекса относительно внешних транспортных сетей (магистральных железных дорог, автодорог для вывоза полезного ископаемого и т.д.).

В-четвертых, одним из важных факторов при размещении объектов поверхности является учет биологической ценности земель. Объекты поверхностного комплекса, особенно занимающие значительные по объему площади (отвалы, склады, промышленные площадки), стремятся не располагать на ценных сельскохозяйственных землях.

В практике открытых горных работ некоторые месторождения разрабатываются группой карьеров. При этом карьеры удалены друг от друга на расстояние 5—10 км, реже 10—20 км и более. В этих условиях целесообразно создание общих для нескольких карьеров поверхностных сооружений (отвалов, дробильно-сортировочных и обогащительных фабрик, вспомогательных комплексов), что позволяет сократить затраты, а значит, повысить эффективность открытых разработок. Месторасположение этого общего объекта должно выбираться исходя из производственной мощности отдельных объектов (обратно пропорционально грузопотокам).

В-пятых, при расположении промышленной площадки необходимо учитывать ее тип и назначение. Если промышленная площадка включает в себя дробильно-обогащительную, дробильно-сортировочную фабрики (ДОФ, ДСФ), склады полезного ископаемого, ремонтные комплексы, административно-бытовой комбинат и вспомогательные сооружения, расположение ее должно главным образом удовлетворять транспортным требованиям.

При промышленной площадке с ремонтной базой, административно-бытовым комбинатом и комплексом вспомогательных сооружений предпочтение отдается удобству санитарно-бытового обслуживания трудящихся.

Во всех случаях для уменьшения размеров промышленной площадки и протяженности транспортных и инженерных коммуникаций следует стремиться к блочному расположению производственных зданий и сооружений, что позволяет снизить их стоимость.

Наиболее характерными блоками можно считать следующие.

1. Блок ремонтного хозяйства, включающий в себя механические и электромеханические мастерские.

2. Блок складского хозяйства, включающий в себя склады запасных частей, материалов и оборудования.

Оба блока представляют собой промышленные здания (одноэтажные), внутрь которых вводятся железнодорожные пути нормальной колеи. В торце блоков размещаются открытые площадки, оборудованные кранами для хранения оборудования. Служебные помещения встроены на антресолях блока.

3. Административно-бытовой блок, включающий в себя контору, диспетчерский пункт, химическую лабораторию, здравпункт, столовые.

4. Блок железнодорожного хозяйства, включающий в себя локомотивное и вагонное депо, экипировочные пути и т.д.

5. Блок автомобильного хозяйства, включающий в себя площадки для хранения автосамосвалов, технического обслуживания и ремонта, гараж хозяйственных и дорожных машин.

6. Склады полезных ископаемых разного назначения.

Жилой поселок обычно располагают на расстоянии не более 1—3 км от предприятия с тем, чтобы время на передвижение трудящихся к месту работы не было бы чрезмерно велико. С этой же целью, как правило, стремятся добиться попутности людских потоков, следующих из поселка на промышленную площадку и в карьер. При расположении жилого поселка необходимо учитывать розу ветров, так как поселок не должен располагаться с наветренной стороны от промышленных объектов (отвалов, промышленных площадок, открытых складов и т.д.).

Во многих случаях, особенно на крупных карьерах, предпочтение отдается не поселкам, а благоустроенным городам, что значительно улучшает бытовые условия горняков. Перевозка работающих осуществляется на расстояние до 10—20 км, а иногда и более. Крупные массовые взрывы на больших предприятиях также обуславливают удаление жилья.

Входящие в поверхностный комплекс объекты связаны между собой линиями инженерных коммуникаций и транспортными сетями. Рациональное расположение объектов, обеспечение целесообразной схемы транспортных коммуникаций, систем энергоснабжения, водоснабжения и других служб, необходимых при проектировании генерального плана, представляет собой задачу первостепенной важности.

Целесообразно кооперирование с другими промышленными организациями при строительстве и эксплуатации общих транспортных сетей, инженерных коммуникаций, объектов жилищного и культурно-бытового назначения, складского хозяйства и т.д.

При проектировании генерального плана карьера необходимо стремиться также к архитектурному единству и планировочной согласованности в организации всей территории предприятия с учетом требований промышленной эстетики.

Расположение объектов поверхностного комплекса вместе с внутрикарьерными путями определяет транспортную трассу (линию расположения оси пути в пространстве). Проекцию трассы на горизонтальную плоскость называют планом пути, а на вертикальную плоскость — профилем пути.

Практически все карьерные пути представлены огромным числом элементов различного профиля. Для упрощения транспортных расчетов принято заменять несколько рядом лежащих действительных элементов профиля одним элементом с условным профилем

$$i_{yc} = 1000(h_k - h_n)/\Sigma l_i, \quad (1.1)$$

или

$$i_{yc} = \Sigma l_i i_i / \Sigma l_i, \quad (1.2)$$

где h_k и h_n — конечная и начальная отметки спрямляемого участка; i_i и l_i — уклон (‰) и длина (м) каждого из элементов профиля, замененного условным.

Условным профилем по формулам (1.1) и (1.2) можно заменять только элементы профиля, которые близки по величине и одного знака. Условие возможности замены можно записать следующим образом:

$$l_i \geq 2000/\Delta i,$$

где Δi — абсолютная разность отметок между условным профилем i_{yc} и реальным уклоном участка.

Сопряжение элементов продольного профиля карьерных путей без переходных кривых допускается при разности уклонов смежных элементов $\leq 8 \div 9$ ‰. Радиус вертикальных кривых принимается равным 2000 м.

Криволинейные участки профиля длиной l_R можно заменить дополнительным подъемом i_d на длине условного профиля Σl_i в соответствии с равенством работы сил сопротивления на кривой и дополнительном уклоне

$$w_R l_R = i_d \Sigma l_i,$$

где w_R — дополнительное удельное сопротивление от кривой, Н/кН.

Откуда величина дополнительного уклона составляет

$$i_d = w_R l_R / \Sigma l_i.$$

При наличии нескольких криволинейных участков на спрямляемом уклоне величина полного условного уклона составит

$$i_{yc}^{пол} = i_{yc} + i_d' + i_d'' + \dots + i_d^n, \quad (1.3)$$

где i_d' и i_d'' — соответственно дополнительные подъемы от замены первого и второго криволинейных участков.

Условный профиль должен сохранять характерные особенности действительного профиля. Поэтому профиль карьерного пути можно представить состоящим из нескольких элементов, существенно отличающихся друг от друга (пути на уступах, в траншее, на поверхности, при заезде на отвал и на отвале).

При нескольких уступных или отвальных путях величину уклона также можно (если они близки по значению) взять средневзвешенную среди условных уступных или отвальных. В этом же случае средневзвешенная длина уступных L_y и отвальных L_o путей, а также средневзвешенная длина съездов (с уклоном i_c) карьера L_c и подъема (с уклоном i_o) до отвала $L_{по}$ определяется с учетом грузопотоков:

$$L_y = \sum Q_{iy} L_{iy} / \sum Q_{iy}; \quad L_o = \sum Q_{io} L_{io} / \sum Q_{io};$$

$$L_c = \sum Q_{iy} H_{iy} / (i_c \sum Q_{iy}); \quad L_{по} = \sum Q_{io} H_{io} / \sum Q_{io},$$

где $\sum Q_{iy}$, $\sum Q_{io}$ — объем горной массы, поступающей с i -го уступа или на i -й отвал, m^3 ; L_{iy} и L_{io} — средняя длина i -го уступа или отвала, м; H_{iy} и H_{io} — высота подъема с i -го уступа карьера или на отвал, м.

1.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РУДНИЧНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИНАХ

1.2.1. Условия эксплуатации и требования, предъявляемые к транспортным машинам

Особенностями работы подземного транспорта являются:

- стесненность рабочего пространства, ограниченного размерами горных выработок;
- перемещение пунктов погрузки вслед за перемещением фронта горных работ, требующее передвижки, перемонтажа, укорачивания или удлинения транспортных коммуникаций или установок;
- повышенная запыленность, влажность шахтной атмосферы;
- химическая активность шахтных вод;
- взрывоопасность рудничной атмосферы.

Эти особенности требуют применения на шахтах транспортных машин и оборудования с малыми габаритами, повышенной прочностью и износостойкостью, приспособленных к быстрому перемонтажу, изменению длины и т.д.

1.2.2. Назначение и классификация рудничного транспорта

Основной задачей подземного транспорта является перемещение полезного ископаемого от забоев до погрузочного пункта на поверхности шахты. Кроме того, транспортные машины служат для перемещения породы в отвал, доставки закладочного материала в выработанное пространство, машин и оборудования к забоям, запасных частей, крепежных и других материалов, а также для перевозки людей к местам работы и обратно.

Многообразие специфических условий эксплуатации и требований, предъявляемых в связи с этим к транспортным машинам, предопределяет применение в шахтах большого количества разнообразных транспортных средств, отличающихся друг от друга принципом действия, способом транспортирования, типом тяговых и грузонесущих органов, видом потребляемой энергии, конструктивными особенностями и другими признаками.

По *принципу действия* средства транспорта разделяют на установки непрерывного и цикличного (периодического) действия. Установки непрерывного действия перемещают груз непрерывным потоком (конвейеры, гидро- и пневмотранспортные установки, установки с замкнутым тяговым канатом, гравитационные и др.). Транспортные машины циклического действия имеют ярко выраженный цикл работы: погрузка, движение с грузом, разгрузка, движение порожняком и маневровые операции (локомотивы, скреперы, самоходные вагоны, погрузочно-транспортные машины и др.).

По *способу транспортирования* различают транспортные машины, перемещающие груз:

- волочением (скребковые конвейеры, скреперы и др.);
- скольжением (гравитационные установки и др.);
- микробросками (вибрационные конвейеры);
- переносом (ленточные конвейеры, вагонетки и др.);
- в воздушной (пневмотранспорт) или водной (гидротранспорт) среде.

По *типу тяговых органов* средства транспорта разделяют на установки, оборудованные:

- тяговыми цепями (скребковые конвейеры, элеваторы, толкатели и др.);
- лентами (ленточные конвейеры, элеваторы и др.);
- канатами (скреперы, канатные концевые и бесконечные откатки, монорельсовые дороги с канатной тягой, канатно-подвесные дороги и др.);

- колесами (локомотивы, самоходные вагоны, погрузочные и погрузочно-транспортные машины и др.);
- гусеничными тяговыми элементами (тракторы, бульдозеры, погрузочные машины и др.),

а также без тяговых элементов (качающиеся и вибрационные конвейеры и питатели, гидро- и пневмотранспортные установки и установки гравитационного транспорта).

По продолжительности работы без перемещения на новое место средства транспорта разделяют на **стационарные** — более 1,5 лет (ленточные конвейеры, гидротранспортные и канатные установки, оборудование погрузочных пунктов и другое транспортное оборудование, работающее в капитальных выработках); **полустационарные** — до 1,5 лет (телескопические и другие конвейеры, работающие в призабойных выработках и периодически укорачиваемые или удлиняемые по мере продвижения забоев, монорельсовые дороги и др.); **передвижные** — до 15 сут (перегрузатели, забойные конвейеры) и др.

На угольных шахтах основными видами подземного транспорта являются локомотивный и конвейерный, реже — гидравлический и гравитационный; на шахтах черной и цветной металлургии, горно-химического сырья и строительных материалов — локомотивный, самоходный, скреперный и гравитационный.

Транспорт, работающий в границах подземного горного предприятия, называют **внутренним**, а обеспечивающий вывоз полезного ископаемого из шахты и доставку оборудования и различных материалов с поверхности в шахту — **транспорт поверхности**. Внутренний транспорт в зависимости от места работы разделяют на забойный, участковый, магистральный, транспорт в околоствольных дворах и наклонных стволах. Транспорт поверхности — от ствола до пунктов погрузки в средства внешнего транспорта (отгрузка продукции потребителю); до складов, отвалов породы и др.

На поверхности шахт используют все виды транспорта, но чаще других — конвейерный, автомобильный и гравитационный. В качестве внешнего транспорта применяют главным образом железнодорожный. Перемещение горной массы по забоям и от забоев до поверхности конвейерами называют **доставкой**, в вагонетках по рельсовым путям с углом наклона от 0 до 30° — **откаткой**, в вагонетках и скипах по рельсовым путям с углом наклона более 30° и конвейерами по наклонным стволам шахт (независимо от угла наклона) — **подъемом**.

Наиболее прогрессивными видами основного транспорта следует считать конвейерный и гидравлический, которые обеспечивают непре-

рывное, поточное перемещение грузов при минимальных затратах ручного труда и легко поддаются автоматизации. Производительность этих видов непрерывного транспорта практически не ограничена.

Каждый из названных выше видов транспортных средств и вспомогательного оборудования имеет большое количество конструктивных разновидностей и типоразмеров применительно к различным условиям эксплуатации.

1.2.3. Комплексы и схемы транспорта

Под **комплексом шахтного транспорта** понимают управляемую систему, объединяющую транспортные машины, установки и вспомогательное оборудование (включая перегрузочные, погрузочно-разгрузочные устройства, а также средства диспетчеризации и автоматизации) и предназначенную для перемещения полезного ископаемого, породы, кладочного материала и вспомогательных грузов по определенным транспортным коммуникациям в заданном направлении.

В зависимости от места размещения транспортных средств и их назначения различают:

- **участковые** транспортные комплексы, работающие в горизонтальных, наклонных и вертикальных выработках, расположенных в пределах выемочной панели или выемочного участка; предназначены для транспортирования полезного ископаемого от очистных забоев до основного горизонта шахты, полезного ископаемого и породы или только породы от подготовительных забоев до основного горизонта, доставки оборудования и вспомогательных грузов к очистным и подготовительным забоям и для перевозки людей;
- **магистральные** — размещенные в главных горизонтальных и капитальных наклонных выработках, предназначенные для транспортирования полезного ископаемого и породы от участковых транспортных комплексов до околоствольного двора, вспомогательных грузов и перевозки людей от околоствольного двора к участковым выработкам;
- транспортные комплексы **околоствольных дворов** — для приема полезного ископаемого и породы и перегрузки их в средства подъема, а также для приема вспомогательных грузов с поверхности и направления их к забоям;
- транспортные комплексы **поверхности шахт** — для транспортирования полезного ископаемого и породы от ствола шахты до

средств внешнего транспорта или до мест их складирования (складов полезного ископаемого, отвалов породы);

- комплексы, предназначенные для транспортирования **закладочных материалов** с поверхности до мест закладки выработанного пространства в шахте.

Под **схемами транспорта** понимают совокупность схем транспортных выработок и других транспортных коммуникаций, на которых условными обозначениями показываются виды и наименования типов применяемого транспортного оборудования. Разнообразие горно-технических условий на шахтах предопределяет возможность применения большого числа схем подземного транспорта.

В зависимости от числа видов основного транспорта различают **простые** (с одним видом) и **комбинированные** схемы транспорта. К простым схемам относят схемы с гидротранспортом, конвейерные, с локомотивным транспортом.

К комбинированным схемам относят транспорт шахт, когда применяют несколько видов основного транспорта. Например, самоходный или конвейерный по участковым выработкам, локомотивный — по магистральным, гравитационный — по наклонным и вертикальным участковым выработкам, конвейерный — по магистральным и т.п.

1.2.4. Грузооборот и грузопотоки

Грузооборотом называют количество груза в тоннах или кубических метрах, перемещаемого за сутки или год в пределах горного предприятия. Обычно большую часть грузооборота на шахтах составляет перемещение полезного ископаемого, меньшую — пустой породы, закладочных материалов и хозяйственно-технических грузов.

Грузооборот определяется проектной мощностью шахты и периодически изменяется по мере развития горных работ.

Нормами технологического проектирования установлен следующий ряд мощностей угольных шахт: 6000, 8000, 10 000, 12 000, 15 000, 20 000 и 25 000 т/сут и более. При благоприятных горно-геологических условиях на участках с весьма большими запасами может предусматриваться проектирование и более мощных шахт.

В отдельных случаях на шахтах с ограниченными запасами углей дефицитных марок (при надлежащем обосновании) допускается мощность менее 6000 т/сут.

Мощность рудников черной металлургии колеблется от 1000 до 10 000 т/сут, цветной — от 500 до 4000 т/сут.

Величина грузооборота современных шахт непрерывно возрастает. Объем транспортных работ на шахте определяется величиной грузооборота и расстоянием транспортирования.

Количество груза в тоннах или кубических метрах, перемещенного по определенной трассе в единицу времени (смену, час, минуту), называют **грузопотоком**.

Величина неравномерности грузопотока характеризуется **коэффициентом неравномерности** k_n , который изменяется в широких пределах в зависимости от технических, технологических, организационных и других факторов и выбирается на основании статистических данных или определяется расчетным путем.

Наибольшей неравномерностью характеризуются грузопотоки из подготовительных забоев и на выемочных участках, наименьшей — в магистральных выработках и околоствольных дворах.

Максимальная величина часовых грузопотоков в магистральных выработках крупных угольных шахт достигает 4000 т, а рудных — 6500 т, что требует применения различных (по производительности) средств транспорта.

Выбор средств транспорта выполняют по максимальной для данных условий эксплуатации величине грузопотока (производительности), который в таких случаях называют **расчетным** (Q_p , т/ч, т/мин).

1.3. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУЗОВ

Одними из основных критериев правильного выбора и надежной эксплуатации транспортных машин являются физико-механические характеристики транспортируемых грузов.

Основные грузы (полезное ископаемое, вскрышная порода на карьерах и порода в шахтах) относятся, как правило, к насыпным грузам, т.е. транспортируемым внасыпку. Большинство вспомогательных грузов (оборудование и т.д.) классифицируют как штучные грузы. Насыпные грузы, перевозимые в таре, также относятся к штучным грузам. Штучные грузы характеризуются габаритами и массой. Насыпная горная масса отличается большим разнообразием свойств, влияющих на эффективность транспортирования: кусковатость, плотность, угол естественного откоса, крепость, абразивность, влажность, слеживаемость, склонность к пылеобразованию и самовозгоранию, тиксотропность и др.

Кусковатость, или гранулометрический состав, характеризуется количественным соотношением кусков различной крупности в горной массе (в % по массе).

Крупность определяют посредством замером кусков по трем взаимно перпендикулярным направлениям, причем наибольший размер куска условно называют его длиной (a').

Различают рядовые грузы, если отношение максимального размера куска $a'_{\max}$, содержащегося в разрыхленной массе, к минимальному $a'_{\min}$ равно или больше 2,5, и сортированные, когда $a'_{\max}/a'_{\min} \leq 2,5$.

Рядовые грузы можно характеризовать типичным куском. Если в рядовом грузе содержится менее 10 % (по массе) кусков длиной, изменяющейся от $a'_{\max}$ до $0,8a'_{\max}$, то кусок размером $0,8a'_{\max}$ считается типичным. Если более или равно 10 %, то типичным считается кусок, длина которого равна $a'_{\max}$.

Для сортированных грузов типичным является средний кусок, длина которого $a'_{\text{cp}} = (a'_{\max} + a'_{\min})/2$.

Для породы, угля и большинства других насыпных грузов, исключая руду, принята следующая градация по крупности кусков: пылевидные — менее 0,05 мм; порошкообразные — $0,05 \div 0,5$ мм; зернистые — $0,5 \div 10$ мм; мелкокусовые — $10 \div 60$ мм; среднекусовые — $60 \div 160$ мм; крупнокусовые — $160 \div 320$ мм; особо крупнокусовые — размер куска более 320 мм.

Для определения кусковатости руды существует другая градация по крупности кусков: рудная мелочь — менее 100 мм; среднекусовая — $100 \div 300$ мм; крупнокусовая — $300 \div 600$ мм; очень крупная (негабарит) — более 600 мм.

Кусок, максимально допустимый размер которого позволяет свободно размещаться в ковше погрузочно-транспортной машины или экскаватора, проходить по перепускным выработкам через перегрузочные пункты, располагаться на рабочих органах транспортных машин, называется **габаритным** или **кондиционным** (400—600 мм), а больших размеров — негабаритным. Груз, содержащий большое число негабаритов, называют весьма крупнокусовым.

По кусковатости транспортируемого груза выбирают вид транспорта, размеры грузонесущих органов и габариты транспортных машин.

Плотность груза представляет собой отношение массы груза к занимаемому им объему, т.е. массу единицы объема (т/м^3). Плотность горной породы приводится или в массиве (т.е. в естественном состоянии) γ (т/м^3), или в разрыхленном состоянии (насыпная плотность) γ_p (т/м^3). Отношение этих двух величин γ/γ_p , которое всегда больше 1, определяет

коэффициент разрыхления K_p . Коэффициент разрыхления характеризует увеличение объема разрыхленной горной массы по сравнению с объемом в массиве. Для крепких пород и руды — $K_p = 1,4 \div 1,8$, для мягких пород — $K_p = 1,2 \div 1,3$. Коэффициент разрыхления горной массы зависит от ряда факторов, таких, как способ разрыхления горных пород (буровзрывной или механический), способы погрузки и перемещения. В расчетах обычно пользуются средними значениями коэффициента разрыхления в транспортном сосуде.

По плотности γ (т/м³) все грузы разделяют на следующие:

Легкие	1,0—2,0
Средние.....	2,0—2,5
Тяжелые	2,5—3,0
Весьма тяжелые	3,0—4,0

Насыпную плотность горной массы учитывают при определении производительности транспортных машин и выполнении тяговых расчетов.

Углом естественного откоса насыпного груза называют угол, образуемый свободной боковой поверхностью сыпучей массы с горизонтальной плоскостью, на которой он покоится.

При движении транспортной машины на насыпной груз действуют колебания и толчки, увеличивающие подвижность частиц. Поэтому различают угол естественного откоса в покое (ρ') и в движении (ρ), причем $\rho < \rho'$, а связь между ними выражается зависимостью $\rho = (0,5 \div 0,7)\rho'$.

Величина угла естественного откоса ρ' зависит от кусковатости горной массы, влажности и других характеристик. Так, например, для мягких вскрышных пород $\rho = 15 \div 20^\circ$, для руд черных и цветных металлов $\rho = 30 \div 35^\circ$.

По величине угла естественного откоса в движении определяют площадь поперечного сечения или объем насыпного груза на грузонесущих органах транспортных установок.

Различают также угол обрушения ($\rho_{обр}$), возникающий между образующей конического развала насыпного груза при его обрушении (например, в бункере) и горизонтальной плоскостью.

Тангенс угла естественного откоса называют коэффициентом внутреннего трения горной массы.

Крепость горных пород оценивается коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова:

$$f = 10^{-7} \sigma_{сж},$$

где $\sigma_{сж}$ — предел прочности горной породы на сжатие, Па.

Между крепостью горных пород и плотностью, как правило, существует зависимость: чем больше крепость, тем больше и плотность (табл. 1.1).

Абразивность — свойство горной массы истирать (изнашивать) взаимодействующие с нею поверхности (загрузочные лотки, кузова вагонов и автомобилей, конвейерные ленты и т.д.) в процессе погрузки, транспортирования и разгрузки. Транспортируемые горные породы по абразивности разделяют на четыре группы: *A* — неабразивные (в горной промышленности нет); *B* — малоабразивные (мокрая глина, угли, гравий); *C* — среднеабразивные (песок, антрацит); *D* — высокой абразивности (руда, бокситы). Группа абразивности зависит от крепости, размеров и формы частиц горной массы. Крепкие и весьма крепкие руды и вскрышные породы являются высокоабразивными. При транспортировании их грузонесущие и другие элементы средств рудничного транспорта подвергаются интенсивному износу.

При выборе и эксплуатации транспортных машин, применяемых для перевозки средне- и высокоабразивных насыпных грузов, необходимо принимать меры по снижению износа грузонесущих элементов путем подбора соответствующих материалов, использования защитных футеровок, выбора оптимального режима работы машин.

Таблица 1.1

Основные характеристики насыпных грузов

Груз	Насыпная плотность γ_p , т/м ³	Коэффициент разрыхления K_p	Угол естественного откоса груза в покое ρ' , градус	Коэффициент крепости полезного ископаемого f
Антрацит мелкокусковой, сухой	0,8—0,95	1,4	45	2,3
Уголь каменный кусковой, рядовой	0,8—0,95	1,4	30—45	2
Уголь бурый	0,85—1,0	1,3	27—30	2,5
Кокс среднекусковой	0,48—0,53	1,3	35—50	1,5
Торф кусковой, сухой	0,33—0,5	1,4	32—45	1,3
Руда железная:				
красный железняк	2,0—2,8	1,4—1,6	45—50	14—16
бурый железняк	1,2—2,0	1,4—1,6	45—50	14—16
магнитный железняк	2,5—3,5	1,4—1,6	45—50	14—16
Руда марганцевая	1,4—2,0	1,3	40—45	3
Известняк мелкокусковой	1,2—1,5	1,3	40—45	2,8
Глина:				
углистая	1,2—1,3	1,6	27—30	2,8
мергелистая	1,5	1,2	32—35	3,5
плотная	1,6	1,2	32—35	4
серая	1,9	1,2	38—40	4,5

Груз	Насыпная плотность γ_p , т/м ³	Коэффициент разрыхления K_p	Угол естественного откоса груза в покое ρ' , градус	Коэффициент крепости полезного ископаемого f
Суглинки лёссовидные	1,6	1,2	35	4
Песок:				
сухой	1,4—1,65	1,15	30—35	—
сырой	1,9	1,1	30	—
углистый	1,7—1,8	1,12	38—40	—
Сланцы известковые и песчаные	1,9—2,0	1,6	40—45	4,8
Скальные породы	1,8—2,0	1,6	40—45	7,0—15

Влажность — содержание воды в транспортируемом материале, определяется высушиванием в сушильном шкафу предварительно взвешенной порции груза при температуре +105 °С в течение 4 ч и выражается в процентах:

$$\omega = 100(m_1 - m_2)/m_2,$$

где m_1 и m_2 — масса порции груза соответственно до и после просушивания, г.

Влажная горная масса, находящаяся некоторое время в неподвижном состоянии, подвергается слеживанию — уплотнению. Содержание во влажной горной массе глинистых частиц повышает ее слеживаемость и липкость.

Липкость, слеживаемость и смерзаемость, а также **кусковатость** определяют склонность насыпных грузов к сводообразованию — самопроизвольному возникновению сводов под выпускными отверстиями блоков, рудоспусков, бункеров и других емкостей. Сводообразование препятствует свободному истечению насыпных грузов из отверстий емкостей.

1.4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАСЧЕТА ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

1.4.1. Производительность

Под производительностью понимают количество груза, транспортируемое в единицу времени. За единицу количества груза принимают тонну (т) или кубический метр (м³), за единицу времени — час (ч), в соответствии с этим различают производительность, выраженную в единицах массы Q (т/ч) или единицах объема V (м³/ч). Связь между произ-

водительностью по массе с производительностью по объему определяется соотношением $Q = V\gamma_p$, где γ_p — насыпная плотность транспортируемого груза.

На открытых работах количество перемещаемого полезного ископаемого принято выражать в тоннах, а вскрышных пород — в кубометрах. Производительность транспортной машины определяется как ее конструктивными параметрами, так и физико-механическими характеристиками перемещаемых грузов, а также технологическими и организационными условиями эксплуатации. В связи с этим различают три вида производительности: *теоретическую, техническую и эксплуатационную*.

Теоретической, или паспортной (указывается в паспорте машины), называют производительность, которая достигается при непрерывной работе машины с полной нагрузкой.

Для машин **цикличного** действия теоретическая производительность $Q_{ц.теор}$ (т/ч) или $V_{ц.теор}$ (м³/ч) определяется соответственно грузоподъемностью G (т) транспортной машины (наибольшая допустимая к перевозке масса груза в вагоне, кузове автосамосвала и т.д.) или ее вместимостью V_m (м³) и длительностью рейса (цикла) T_p (с, мин, ч).

Таким образом, считая длительность рейса в часах, например, можно записать

$$Q_{ц.теор} = G/T_p, \text{ т/ч, или } V_{ц.теор} = V_m/T_p, \text{ м}^3/\text{ч.} \quad (1.4)$$

Длительность рейса T_p (цикла) транспортной машины определяется затратами времени на погрузку ($t_{пог}$), движение с грузом ($t_{гр}$), разгрузку (t_r), движение порожняком ($t_{пор}$) и маневровые операции (t_m):

$$T_p = t_{пог} + t_{гр} + t_r + t_{пор} + t_m. \quad (1.5)$$

Для машин **непрерывного** действия теоретическая производительность $Q_{н.теор}$ (т/ч) или $V_{н.теор}$ (м³/ч) определяется соответственно линейной нагрузкой (на единицу длины) q (Н/м) или линейной вместимостью, определяемой максимальной площадью поперечного сечения груза на грузонесущем органе F_n (м²), движущегося со скоростью v (м/с).

Таким образом,

$$Q_{н.теор} = 3,6 qv/g \text{ или } V_{н.теор} = 3600 F_n v. \quad (1.6)$$

Минутную теоретическую производительность подземных ленточных конвейеров принято называть *приемной способностью*, т.е. максимальное количество горной массы, которую может принять в минуту движущаяся лента конвейера (т/мин или м³/мин).

В реальных условиях эксплуатации пользуются значениями *технической* и *эксплуатационной* производительности.

Техническая производительность соответствует номинальному режиму работы транспортной машины при полном использовании ее конструктивных возможностей. Ее величина не постоянна и устанавливается с учетом мощности привода и прочности тяговых элементов в зависимости от условий эксплуатации (длины и угла наклона). Техническая производительность всегда меньше теоретической и ее используют при выборе транспортных средств.

Для транспортных машин **циклического** действия:

$$Q_{ц.техн} = GK_q/T'_p \text{ или } V_{ц.техн} = V_M K_v/T'_p, \quad (1.7)$$

где K_q и K_v — соответственно коэффициент использования грузоподъемности машины и вместимости грузонесущего органа; T'_p — время цикла с учетом необходимых технологических простоев (например, при обмене транспортных средств у экскаватора или погрузочной машины и т.д.).

Для машин **непрерывного** действия:

$$Q_{н.техн} = 3600 F_0 k_\psi \gamma k_\beta v, \text{ т/ч, или } V_{н.техн} = 3600 F_0 k_\psi \gamma k_\beta v, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (1.8)$$

где k_ψ — коэффициент, учитывающий степень заполнения геометрического сечения грузонесущего органа, причем $k_\psi = F/F_0$; F — фактическая площадь поперечного сечения груза на грузонесущем органе, м^2 ; F_0 — максимально возможная площадь поперечного сечения груза на грузонесущем органе, соответствующая его геометрическим параметрам и свойствам груза, м^2 ; k_β — коэффициент, учитывающий изменение производительности машины непрерывного действия от угла наклона ее установки; v — скорость движения тягового органа, м/с .

На рис. 1.2 представлен график изменения производительности транспортной машины циклического и непрерывного действия, из которого видно, что производительность транспортной машины циклического действия уменьшается с увеличением длины транспортирования, а производительность машины непрерывного действия от длины транспортирования не зависит.

Для подвесной канатной дороги или для шахтной канатной откатки непрерыв-

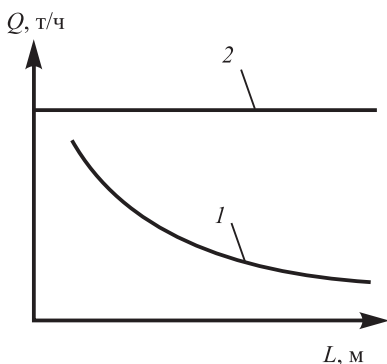


Рис. 1.2. Зависимость производительности транспортной машины Q от длины транспортирования L для машины периодического (1) и непрерывного действия (2)

ного действия, на которой груз перемещается в вагонетках грузоподъемностью G (кг), закрепленных на тяговом органе с определенным интервалом l (м), линейная нагрузка будет $q = Gg/l$ (Н/м), а производительность (т/ч)

$$Q_{\text{н.техн}} = 36Gv/l = 36G/t,$$

где $t = l/v$ — интервал времени подачи груженых вагонеток на трассу.

Эксплуатационная производительность $Q_{\text{эксп}}$ — фактическая производительность транспортной машины с учетом интенсивности загрузки и простоев по техническим, организационным и технологическим причинам. Определяется обычно за более длительный период времени (т/год, м³/год; т/мес., м³/мес.; т/сут, м³/сут; т/смену, м³/смену) и оценивается с учетом надежности работы машины.

Таким образом, эксплуатационная производительность машины за год

$$Q_{\text{эксп}} = Q_{\text{техн}} T_{\text{раб}} k_{\text{г}} \text{ или } V_{\text{эксп}} = V_{\text{техн}} T_{\text{раб}} k_{\text{г}}, \quad (1.9)$$

где $T_{\text{раб}}$ — продолжительность работы транспортной машины в течение года, ч; $k_{\text{г}}$ — коэффициент готовности транспортной машины, выражающий вероятность ее исправного состояния в любой момент времени.

1.4.2. Силы, действующие на машину

При работе транспортной машины на нее действуют две группы сил: сопротивления движению и движущие силы.

Сопротивления движению W (Н), как правило, представляют собой неуправляемые внешние силы, различные для каждого из видов транспортных машин, но всегда зависящие от степени загрузки машины, режима ее работы, характера трассы (величины уклона, наличия криволинейных участков и т.д.) и скорости движения.

У транспортных машин **циклического** действия различают основное (W_0) и дополнительное ($W_{\text{д}}$) сопротивления движению. Дополнительное сопротивление включает в себя: сопротивление от уклона (W_i), сопротивление на криволинейных участках трассы (W_R), сопротивление от воздушной среды ($W_{\text{возд}}$). Таким образом, полное сопротивление

$$W = W_0 + W_{\text{д}} = W_0 \pm W_i + W_R + W_{\text{возд}}. \quad (1.10)$$

Рассматриваемые сопротивления не зависят от режима движения транспортной машины (ускорения или замедления), поэтому их принято называть статическими сопротивлениями.

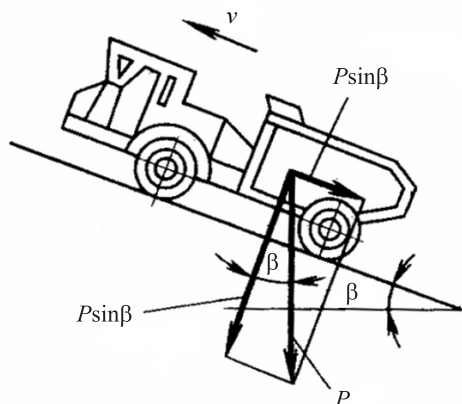


Рис. 1.3. Схема к определению сопротивления движению

При движении транспортной машины весом P (кН) по наклонному пути (рис. 1.3) **нормальная составляющая веса $P\cos\beta$** вызывает сопротивление движению

$$W_o = P\cos\beta w = 1000wM_T g \cos\beta, \text{ Н}, \quad (1.11)$$

где w — коэффициент сопротивления движению машины; g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; β — угол наклона трассы к горизонту.

Сопротивление W_o присутствует всегда, когда есть движение, поэтому его называют **основным сопротивлением**. Основное сопротивление включает в себя силы трения в подшипниках, шарнирах и других трущихся деталях, а также сопротивления от деформации элементов трассы, трения качения колес по внешней опоре при движении и т.д. Основное сопротивление всегда направлено в сторону, противоположную движению транспортной машины.

Коэффициент сопротивления движению

$$w = (df + 2k)/D,$$

где D — диаметр колес; d — диаметр осей цапф; f — коэффициент трения в цапфах; k — коэффициент трения качения.

В выражении (1.11) величину $1000w$ принято называть основным удельным сопротивлением движению (w_o), так как, имея размерность $[\text{Н/кН}]$, представляет собой основное сопротивление перемещению машины в $[\text{Н}]$ на $[\text{кН}]$ веса машины. Максимальный угол подъема трассы транспортных машин циклического действия не превышает $3\text{—}8^\circ$ (в зависимости от типа машины), поэтому в выражении (1.11) считают, что $\cos\beta \approx 1$, тогда

$$W_o = Pw_o = M_T g w_o. \quad (1.12)$$

Основное удельное сопротивление w_o зависит от многих факторов и аналитический расчет его достаточно сложен, поэтому принято пользоваться значениями, полученными экспериментально.

Продольная составляющая веса $P\sin\beta$ (или $M_T g \sin\beta$) появляется только при наличии уклона трассы, т.е. при $\beta \neq 0$, поэтому силу

$$W_i = 1000P\sin\beta = 1000M_T g \sin\beta \quad (1.13)$$

называют **дополнительным сопротивлением от уклона**. При движении вверх эта сила имеет знак «+» и препятствует движению, а при движении вниз — знак «-» и способствует движению.

Так как для небольших углов наклона трассы $\sin\beta \approx \operatorname{tg}\beta$, то $1000\sin\beta$ — величина уклона трассы в тысячных единицах — промилле (‰),

$$W_i = Pi = M_{\text{т}}gi, \quad (1.14)$$

где i — величина уклона, ‰.

По аналогии с основным сопротивлением от уклона

$$W_i = Pw_i = M_{\text{т}}gw_i,$$

где w_i — удельное дополнительное **сопротивление от уклона**, Н/кН, равное величине уклона трассы, выраженной в тысячных единицах.

К дополнительным относятся также **сопротивления на криволинейных участках трассы** (радиусом R , м).

$$W_R = Pw_R = M_{\text{т}}gw_R, \quad (1.14')$$

где w_R — удельное сопротивление на криволинейном участке, Н/кН.

Дополнительное удельное сопротивление на криволинейных участках трассы зависит от радиуса криволинейного участка, $w_R = f(R)$, и определяется экспериментально.

Дополнительное **сопротивление движению от воздушной среды** зависит не от массы машины, а от скорости ее движения, скорости и направления ветра или воздушной среды, лобового сопротивления машины (произведения высоты на ширину) и коэффициента обтекаемости машины. При незначительных скоростях движения машины (меньше 20 км/ч) его редко принимают в расчет.

Полное сопротивление движению (без учета сопротивления от воздушной среды) по формуле (1.10) можно представить в виде

$$W = P(w_0 \pm w_i + w_R) = M_{\text{т}}g(w_0 \pm w_i + w_R). \quad (1.14'')$$

На транспортных установках **непрерывного** действия также можно выделить основное и дополнительные сопротивления, но форма выражений (1.10) — (1.14) имеет в этом случае некоторые особенности.

Во-первых, вместо сосредоточенных масс, имеющих место в транспортных машинах циклического действия, имеем неподвижную (став) и движущуюся массы, распределенные по длине (L , м) транспортной машины непрерывного действия. Обозначив полный вес 1 м движущихся частей машины q , получаем, что для груженой ветви эта величина включает вес груза, отнесенный к 1 м длины установки ($q_{\text{гр}}$, Н/кН), и вес дви-

жущихся частей самой установки ($q_{д.ч}$, Н/м), а для порожней — только вес движущихся частей установки. Во-вторых, угол наклона установок непрерывного действия может быть достаточно велик, а значит, величину $\cos\beta$ нельзя приравнять к единице. В-третьих, коэффициент сопротивления неудобно заменять удельным значением. Таким образом, получаем

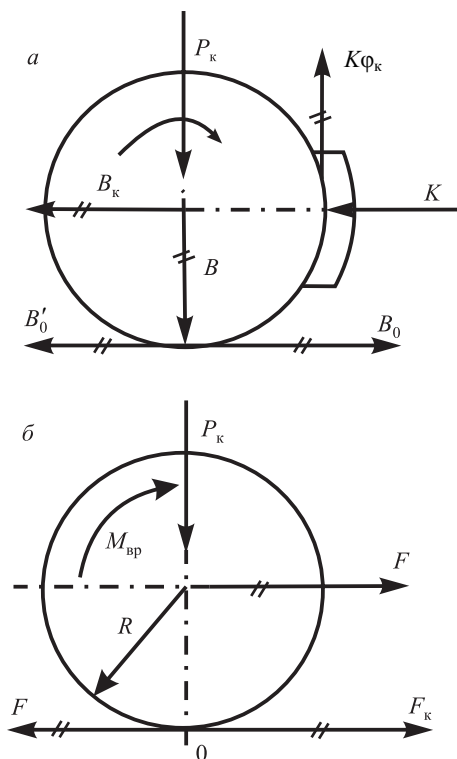
$$W_0 = qL\cos\beta w, \quad (1.15)$$

$$W_i = qL\sin\beta \quad (1.16)$$

или $W = qL(\cos\beta w \pm \sin\beta)$. (1.17)

Эти сопротивления распределены по длине транспортной машины (на грузовой и порожняковой ветвях) и их принято называть **распределенными сопротивлениями**.

Кроме распределенных сопротивлений в транспортных машинах непрерывного действия имеют место **сосредоточенные сопротивления**, которые сконцентрированы на незначительных по длине участках (по сравнению с длиной всей машины). Например, сопротивления на отклоняющем или натяжном барабане, на погрузочном пункте и др. Величина сосредоточенных сопротивлений невелика и составляет примерно 10—15 % распределенных сопротивлений.



Особое место среди сопротивлений занимает **сила торможения** B (Н) — искусственно создаваемая регулируемая внешняя сила, направленная в противоположную движению сторону.

Наиболее общим является создание тормозной силы за счет прижатия тормозных колодок к движущимся колесам или к валам приводных барабанов.

В результате прижатия тормозной колодки к колесу с силой K (кН) возникает сила трения $K\phi_k$, где ϕ_k — коэффициент трения между колодкой и колесом (рис. 1.4, а).

Сила $K\phi_k$, вызывая реакцию буксы колеса B (равную $K\phi_k$), образует с ней внутреннюю пару сил $K\phi_k — B$,

Рис. 1.4. Схемы к определению сил торможения

которую мы заменяем эквивалентной парой сил $B_0—B_k$. Сила B_0 при сцеплении колеса с опорой вызывает реакцию опоры (B'_0), равную по величине силе B_0 , но направленную в противоположную сторону. При наличии этого равенства сила B_k реализуется как тормозная сила

$$B_k = 1000 K\varphi_k. \quad (1.18)$$

Причем величина тормозной силы ограничена силой сцепления колеса с опорой

$$K\varphi_k \leq P_k \psi_T, \quad (1.19)$$

где ψ_T — коэффициент сцепления колеса с дорогой, реализуемый при торможении.

Несоблюдение приведенного условия приводит к заклиниванию колеса (движение «юзом»).

Процесс торможения транспортных машин непрерывного действия несколько сложнее, чем циклического. Например, в конвейерах при торможении барабана отдаленные от привода (а значит, от места торможения) участки ленты в начальный период двигаются с большей скоростью, чем расположенные у привода (набегают на них): появляется возможность потери устойчивости. В таких машинах имеет место ограничение по сцеплению ленты с барабаном, т.е. удержание от скольжения при торможении.

Движущие силы — **сила тяги** (F_k , Н), или **тяговое усилие**, — представляют собой управляемые внешние силы, создаваемые при взаимодействии ведущего колеса машины **циклического** действия с внешней опорой (рельсами или дорогой), а при **непрерывном** транспорте — тягового органа с приводными барабанами, приводными звездочками, блоками и другими элементами для преодоления сопротивления движению. Сила тяги, или тяговое усилие, всегда направлена в сторону движения машины или составляет острый угол с направлением ее движения.

Сила тяги может быть ограничена **источником энергии** (например, **мощностью** дизель-генераторной установки тяговых агрегатов или электрифицированных автосамосвалов), **мощностью** тяговых двигателей (например, мотор-колес автосамосвалов или осевых двигателей локомотивов) и **силой прижатия** приводного колеса к рельсу, дороге, тяговому органу и т.д. (сцепным весом локомотива, автосамосвала, предварительным натяжением тягового органа конвейера). Наиболее характерным для карьерных транспортных машин **циклического** действия является ограничение по сцепному весу машины или машин **непрерывного** действия — натяжением тягового органа.

Для примера рассмотрим взаимодействие приводного колеса с внешней опорой (с рельсом или дорогой), полагая их абсолютно жесткими (рис. 1.4, б).

Обозначим силу прижатия приводного колеса к опоре P_k , а момент вращения, передаваемый на ось колеса двигателем, $M_{вр}$. Заменим $M_{вр}$ парой сил $F—F$ с плечом, равным радиусу колеса. Для движения транспортной машины только этой пары сил недостаточно, так как она является внутренней по отношению к машине. Однако транспортная машина находится на внешней опоре и оказывает на нее давление, поэтому в точке O возникает сцепление колеса с опорой. При вращении же колеса под действием этой пары сил $F—F$ возникает горизонтальная реакция опоры F_k , равная силе F , но направленная в противоположную сторону (значит, эти силы уравновешиваются). Под действием силы F , приложенной в центре колеса, транспортная машина приходит в движение. Так как сила F становится движущей только при наличии реакции опоры F_k , силу тяги называют касательной силой тяги на ободу колеса. Если сила тяги превысит сцепление, нормальное движение (колесо катится по опоре с мгновенным центром вращения в точке O) нарушается и колесо начинает буксовать. Сила тяги при этом резко падает, так как уменьшается сцепление, а часть вращающего момента расходуется на ускорение вращения колеса. Поэтому условием нормального движения является

$$F_k \leq P_k \psi,$$

где ψ — коэффициент сцепления колеса транспортной машины с внешней опорой.

Так как в транспортной машине приводным обычно является не одно колесо, а несколько, то

$$F_k \leq \Sigma P_k \psi.$$

Величину ΣP_k удобно выражать через массу транспортной машины (M_t , т), тогда предыдущее выражение

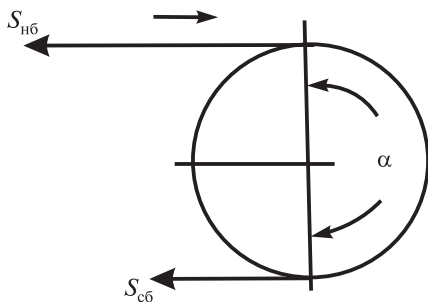
$$F_k \leq 1000 k_c M_t g \psi, \quad (1.20)$$

где k_c — коэффициент сцепной массы, учитывающий долю массы транспортной машины, приходящуюся на ее приводные колеса.

Величина коэффициента сцепления ψ зависит от ряда конструктивных, физических и эксплуатационных факторов и определяется для каждого вида машин экспериментальным путем. На практике пользуются различными методами повышения коэффициента сцепления в тяжелых эксплуатационных условиях (подсыпка песка и т.д.).

Для машин непрерывного действия с гибким тяговым органом отсутствие буксования последнего на приводном барабане или блоке (рис. 1.5) выражается условием

Рис. 1.5. Взаимодействие гибкого тягового органа с приводным барабаном



$$S_{нб} \leq S_{сб} e^{\mu\alpha},$$

где e — основание натуральных логарифмов; $S_{нб}$ и $S_{сб}$ — соответственно натяжение в тяговом органе в набегающей на привод и сбегающей с него ветвей, Н; μ — коэффициент трения (сцепления) между тяговым органом и барабаном (блоком); α — угол обхвата барабана (блока) тяговым органом, рад.

Поэтому условием нормального движения является

$$F_k \leq S_{сб} (e^{\mu\alpha} - 1), \quad (1.21)$$

или

$$F_k \leq S_{нб} (e^{\mu\alpha} - 1) / e^{\mu\alpha}. \quad (1.21')$$

Основной закон трения гибких тел установлен в середине XIX в. членом Петербургской академии наук Леонардом Эйлером и получил название «**закон Эйлера**». Выведенный им закон выражает условие равновесия абсолютно гибкой невесомой и нерастяжимой нити на неподвижном цилиндре. Хотя реальные условия эксплуатации внесли некоторую корректировку в этот закон, он является основой условия устойчивой работы приводов.

1.4.3. Физические основы передачи силы тяги колебаниями

Процесс передачи силы тяги колебаниями удобнее рассмотреть на примере транспортирования отдельной частицы груза. Для перемещения частицы груза массой m по грузонесущему элементу, совершающему *колебания в плоскости его наклона к горизонту* (рис. 1.6), необходимо, чтобы при *прямом ходе*, т.е. при движении грузонесущего элемента в направлении транспортирования, частица груза удерживалась на грузонесущем элементе за счет сил трения покоя и приобретала скорость, равную скорости грузонесущего элемента, а при *обратном ходе* — скользила по грузонесущему элементу за счет сил *инерции*, расходуя запасенную при совместном движении с ним кинетическую энергию на преодоление сил сопротивления, возникающих при скольжении. Такой режим работы возможен при соблюдении следующих условий.

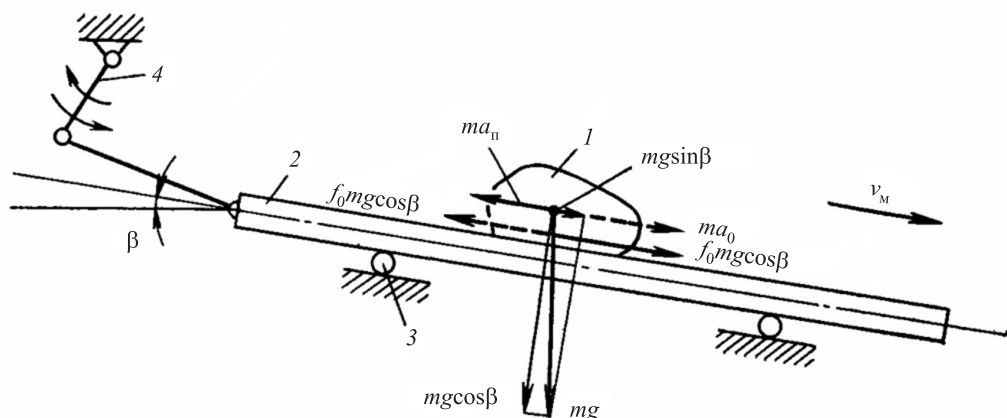


Рис. 1.6. Схема сил, которые действуют на частицу груза, находящуюся на грузонесущем элементе, совершающем колебания в плоскости его наклона к горизонту:

1 — частица груза; 2 — грузонесущий элемент; 3 — опора; 4 — приводное устройство

При *прямом ходе* грузонесущего элемента

$$f_0 mg \cos \beta \geq ma_n \pm mg \sin \beta,$$

или

$$a_n \leq g(f_0 \cos \beta \pm \sin \beta), \quad (1.22)$$

где f_0 — коэффициент трения покоя; g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; a_n — ускорение грузонесущего элемента при прямом ходе, м/с^2 ; β — угол наклона грузонесущего элемента к горизонту, град; знак «+» в скобках соответствует транспортированию груза вниз, знак «-» — вверх.

При *обратном ходе* грузонесущего элемента

$$f_0 mg \cos \beta < ma_0 \pm mg \sin \beta,$$

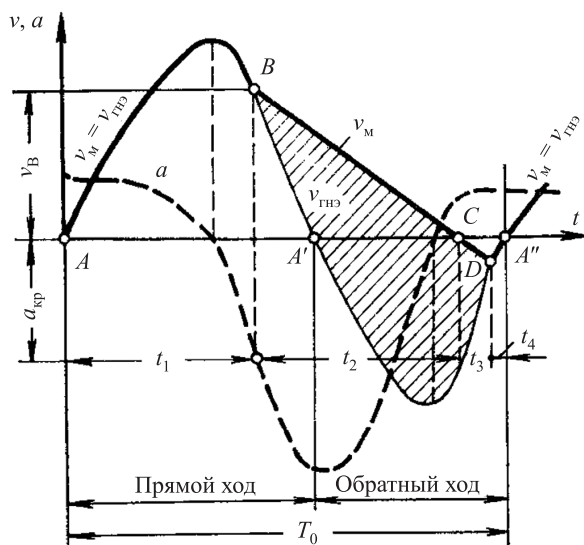
или

$$a_0 \leq g(f_0 \cos \beta \pm \sin \beta), \quad (1.23)$$

где a_0 — ускорение грузонесущего элемента при обратном ходе, м/с^2 ; знак «+» в скобках соответствует транспортированию груза вверх, знак «-» — вниз.

Из диаграммы, приведенной на рис. 1.7, видно, что на значительной части прямого хода скорость грузонесущего элемента плавно возрастает до максимума, а затем резко уменьшается и становится равной нулю в точке A' .

Рис. 1.7. Диаграмма изменения скоростей грузонесущего элемента $v_{ГНЭ}$, груза v_M и ускорения a грузонесущего элемента инерционной транспортной установки



При обратном ходе скорость грузонесущего элемента по абсолютной величине резко возрастает до максимального отрицательного значения, затем также резко уменьшается до нуля в точке A'' . Находящийся на грузонесущем элементе груз

за период времени t_1 прямого хода движется вместе с грузонесущим элементом без проскальзывания. В точке B , когда скорость грузонесущего элемента резко уменьшается, а ускорение достигает некоторой критической величины $a_{кр}$, груз по инерции продолжает двигаться в прежнем направлении с замедлением, скользя по грузонесущему элементу и при его обратном ходе. Поскольку на груз действует постоянная сила трения, равная $fmg\cos\beta$, где f — коэффициент трения скольжения, он скользит по грузонесущему элементу с равнозамедленной скоростью, которая на диаграмме изображена прямой BD .

В точке C скорость груза меняет направление, и он начинает двигаться назад, скользя по грузонесущему элементу. В точке D скольжение прекращается, и груз движется вместе с грузонесущим элементом назад до точки A'' . После этого процесс повторяется. Время t_2 , в течение которого скорость груза уменьшается до нуля, определяется из условия

$$t_2 = v_B / [g(f \cos \beta - \sin \beta)], \quad (1.24)$$

где v_B — скорость груза в точке B .

Заштрихованная на рис. 1.7 площадь, ограниченная прямой BD и кривой DA' , численно равна пути, пройденному грузом за один рабочий цикл T_0 . Критическое замедление, при котором происходит отрыв груза от грузонесущего элемента, согласно условию (1.22) будет

$$a_{кр} = g(f_0 \cos \beta \pm \sin \beta). \quad (1.25)$$

Таким образом, груз движется вперед в течение времени $t_1 + t_2$ при прямом и обратном ходах грузонесущего элемента и только в течение небольшого промежутка времени $t_3 + t_4$ движется назад при обратном ходе грузонесущего элемента. Режим работы транспортной установки выбирают таким, чтобы промежутки времени t_3 и t_4 были минимальными, тогда заштрихованная площадь и, следовательно, путь, пройденный грузом за один цикл, будут максимальными. Давление груза на грузонесущий элемент при этом не изменяется и равно нормальной составляющей силы тяжести груза.

Для перемещения частицы груза по грузонесущему элементу, совершающему колебания в плоскости под углом к направлению транспортирования (рис. 1.8), также необходимо, чтобы груз при прямом ходе удерживался на грузонесущем элементе силой трения.

При колебании грузонесущего элемента в плоскости, наклоненной под углом β к направлению транспортирования, нормальная сила N от действия груза на грузонесущий элемент изменяется в зависимости от направления колебания, т.е.

$$N = mg \pm ma \sin \beta = mg \left(1 \pm \frac{a}{g} \sin \beta \right), \quad (1.26)$$

где знак «+» в скобках относится к движению грузонесущего элемента вверх, а знак «-» — вниз. Транспортные установки с таким режимом работы называют установками с переменным давлением груза на грузонесущие элементы.

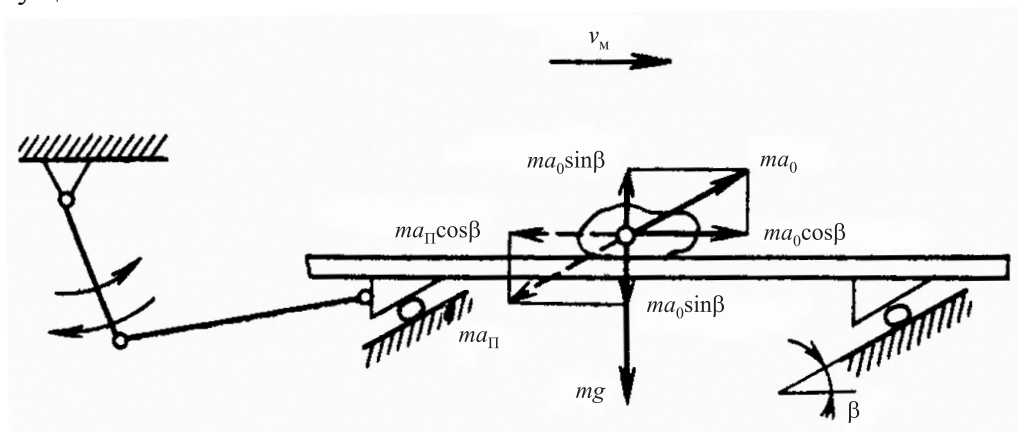


Рис. 1.8. Схема сил, действующих на частицу груза, находящуюся на грузонесущем элементе, совершающем колебания в плоскости под углом β к направлению транспортирования

Чтобы груз в *прямом* направлении двигался, не отрываясь от грузонесущего элемента, необходимо, чтобы сила трения груза $f_0 N$ была равна или больше нормальной составляющей силы инерции $ma_n \cos \beta$, т.е.

$$f_0 N \geq ma_n \cos \beta,$$

или с учетом формулы (1.26)

$$f_0 mg \left(1 \pm \frac{a_n}{g} \sin \beta \right) \geq ma_n \cos \beta,$$

откуда

$$a_n \leq f_0 g / (\cos \beta \pm f_0 \sin \beta). \quad (1.27)$$

При *обратном* ходе груз должен скользить или отрываться от грузонесущего элемента, поэтому сила трения должна быть меньше горизонтальной составляющей силы инерции, т.е.

$$f_0 mg \left(1 \pm \frac{a_0}{g} \sin \beta \right) < ma_0 \cos \beta,$$

откуда

$$a_0 > f_0 g (\cos \beta \pm f_0 \sin \beta). \quad (1.28)$$

При движении грузонесущего элемента вниз давление груза, как это видно из формулы (1.22), может быть равно или даже меньше нуля, следовательно, частица груза может оторваться от грузонесущего элемента и двигаться во взвешенном состоянии до следующей встречи с грузонесущим элементом. Транспортные установки, работающие без отрыва частиц груза от грузонесущего элемента, называются *качающимися*, а с отрывом — *вибрационными*.

Работа таких установок характеризуется **коэффициентом режима** k , величина которого определяется по выражению

$$k = a_{\max} \sin \beta / g = \omega^2 r \sin \beta / g, \quad (1.29)$$

где ω — частота колебаний, с^{-1} ; r — амплитуда колебаний, мм.

Для качающихся конвейеров и питателей $k < 1$, для вибрационных — $k = 1, 2 \div 3, 5$.

Вибрационная транспортная машина, как всякая упругая система, имеет определенную частоту собственных колебаний. В зависимости от соотношения частот собственных и вынужденных колебаний, сообщаемых грузонесущему элементу, различают следующие режимы работы

вибрационных конвейеров и питателей: **дорезонансный** — при котором грузонесущий элемент колеблется с частотой, меньшей частоты собственных колебаний упругой системы вибромашины; **резонансный** — в этом случае частоты собственных и вынужденных колебаний совпадают; **зарезонансный** — грузонесущий элемент колеблется с частотой, превышающей частоту собственных колебаний.

С точки зрения затрат энергии самым экономичным является резонансный режим, однако этот режим не всегда соответствует оптимальным значениям других параметров: максимальной скорости перемещения груза, максимальной производительности и др.

Транспортные машины с колеблющимися грузонесущими элементами, которые одновременно выполняют и функции тяговых элементов, называют *инерционными машинами*, так как сила тяги в них передается грузу посредством сил инерции, возникающих при колебании или вибрации их грузонесущих элементов.

К инерционным машинам непрерывного действия относятся **качающиеся и вибрационные конвейеры и питатели**, а также некоторые типы бункерных поездов, грузонесущие элементы которых выполнены в виде установленных на эластичных опорах желобов, лотков, получают колебательное движение от привода по определенному кинематическому закону, обеспечивающему непрерывное перемещение груза в заданном направлении.

Принципиальная разница в процессе транспортирования груза **качающимися и вибрационными установками** заключается в характере движения груза: в качающихся установках груз скользит по грузонесущему элементу без отрыва от него, а в вибрационных — груз отрывается от грузонесущего элемента и перемещается микробросками. Качающиеся и вибрационные транспортные установки могут перемещать груз как по горизонтальным, так и по наклонным выработкам.

Скорость транспортирования, а следовательно, и производительность таких установок зависят от частоты и амплитуды колебаний, угла наклона грузонесущих элементов, физико-механических свойств груза и других факторов.

Обычно скорость движения груза на качающихся и вибрационных установках находится в пределах 0,05—0,50 м/с, допустимый угол наклона при доставке вниз — до 15°, при доставке вверх — до 3°.

Вибрационные установки со спиральными грузонесущими элементами могут транспортировать груз вверх по вертикальным выработкам.

Качающиеся и вибрационные транспортные установки применяют для транспортирования угля и руды.

1.4.4. Уравнение движения транспортной машины

Перемещение груза в транспортном средстве происходит за счет энергии двигателя, реализуемой в качестве тягового усилия, которое расходуется на преодоление сопротивления движению и повышение скорости движения машины.

Если движение транспортной машины рассматривать как движение массы, сосредоточенной в центре масс (т.е. массу машины привести к центру масс, $M_{\text{пр}}$), и все силы, действующие на машину, считать приложенными к этой же точке, то согласно второму закону Ньютона равнодействующая всех сил R равна массе, умноженной на ускорение:

$$R = M_{\text{пр}} dv/dt. \quad (1.30)$$

Это выражение лежит в основе основного уравнения движения транспортной машины.

Приведенная масса транспортной машины с учетом инерционного влияния на ее величину вращающихся масс

$$M_{\text{пр}} = M_{\text{т}} \delta,$$

где $M_{\text{т}}$ — масса транспортной машины; δ — коэффициент инерции вращающихся масс.

Коэффициент инерции вращающихся масс δ зависит от типа транспортной машины, степени ее загрузки и режимов движения, но всегда $\delta > 1$.

Так как все силы, действующие на транспортную машину, направлены по одной прямой, заменяя векторную сумму сил алгебраической и принимая направление движения машины положительным, равнодействующая сил определяется:

- в режиме движения — соотношением между тяговым усилием и сопротивлением движению — $R = F_{\text{к}} - W$;
- в режиме торможения — соотношением между сопротивлением и тормозным усилием — $R = -B - W$;
- при свободном выбеге — только сопротивлением — $R = -W$.

Таким образом, уравнение (1.30) в режиме движения

$$F_{\text{к}} - W = M_{\text{пр}} dv/dt. \quad (1.31)$$

В этом выражении величина $M_{\text{пр}} dv/dt$ представляет собой динамическое сопротивление (силу инерции).

Из анализа уравнения (1.31) следует, что если $F_{\text{к}} = W$, то скорость постоянна, а $dv/dt = 0$. Если $F_{\text{к}} > W$, то $M_{\text{пр}} dv/dt > 0$, а значит, и $dv/dt > 0$ —

движение ускоренное. При $F_k < W - M_{\text{пр}} dv/dt < 0$ и $dv/dt < 0$ — движение замедленное.

При торможении транспортной машины уравнение движения принимает вид

$$-B - W = M_{\text{пр}} dv/dt. \quad (1.31')$$

При правильной организации торможения (даже если сумма статических сопротивлений меньше нуля) правая часть уравнения (1.31') будет меньше нуля, $dv/dt < 0$ — движение замедленное.

При свободном выбеге уравнение движения принимает вид

$$-W = M_{\text{пр}} dv/dt. \quad (1.31'')$$

В зависимости от знака W в выражении (1.31'') $M_{\text{пр}} dv/dt$, а значит, и dv/dt может быть больше или меньше нуля и даже равным нулю.

1.4.5. Мощность привода транспортной машины

Мощность, потребляемую транспортной машиной N (кВт), определяют по формулам:

- в двигательном режиме

$$N = k_3 F_k v / (1000 \eta); \quad (1.32)$$

- в тормозном (генераторном) режиме

$$N = k_3 F_k v \eta / 1000, \quad (1.32')$$

где k_3 — коэффициент запаса, или резерва мощности, учитывающий кратковременные перегрузки двигателя; η — КПД передачи; v — скорость движения транспортной машины, м/с.

Для транспортных машин с нестабильным режимом работы, например установок периодического действия, мощность двигателя рассчитывают по нагреву, соответствующему эквивалентному тяговому усилию F_3 .

1.4.6. Расход энергии

Расход энергии за цикл $A_{\text{ц}}$ (кВт·ч) транспортной машины определяют по потребляемой мощности за каждый период транспортного цикла, т.е.

$$A_{\text{ц}} = N_1 t_1 + N_2 t_2 + \dots + N_n t_n, \quad (1.33)$$

где $N_1, N_2, \dots, N_n$ — мощность, потребляемая транспортной машиной в течение составляющих времени цикла $T_{\text{ц}}$ (ч) соответственно $t_1, t_2, \dots, t_n$.

Сопоставление расхода энергии различных видов транспортных машин производится по удельным показателям — расходу энергии, отнесенному к массе $G_{\text{гр}}$ (т) перевезенного груза ($a' = A_{\text{ц}}/G_{\text{гр}}$, кВт·ч/т), или к массе груза и расстоянию транспортирования ($a'' = A_{\text{ц}}/(G_{\text{гр}}L)$, кВт·ч/ткм).

1.5. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГРАВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

Рассмотрим условия спуска груза под действием силы тяжести на примере частицы груза 1 (рис. 1.9, а) массой m (кг), скользящей по грузонесущему элементу 2, наклоненному к горизонту под углом β . При постоянных значениях коэффициентов трения покоя f_0 и скольжения f на частицу действуют следующие силы: вес частицы mg (Н); нормальная реакция грузонесущего элемента на частицу груза $N = mg \cos \beta$, Н; сила трения покоя $W_{\text{т}} = f_0 mg \cos \beta$, Н (при неподвижном положении частицы груза), или сила трения скольжения $W_{\text{т}} = f mg \cos \beta$, Н (при скольжении частицы по грузонесущему элементу).

Тангенциальная составляющая веса частицы груза $mg \sin \beta$ (Н) стремится сдвинуть неподвижную частицу по грузонесущему элементу, а сила трения покоя — удержать ее. Таким образом, условие отсутствия скольжения частицы груза по грузонесущему элементу имеет вид

$$mg \sin \beta \leq f_0 mg \cos \beta \text{ или } \operatorname{tg} \beta \leq f_0, \quad (1.34)$$

а условие скольжения —

$$mg \sin \beta \geq f mg \cos \beta \text{ или } \operatorname{tg} \beta \geq f. \quad (1.35)$$

Из формулы (1.34) следует, что минимальный угол наклона грузонесущего элемента, при котором груз еще находится в состоянии покоя, будет $\beta_{\min} = \operatorname{arctg} f_0$, а угол, при котором груз начнет скользить по грузонесущему элементу, $\beta > \operatorname{arctg} f_0$. Однако при скольжении коэффициент трения уменьшится, и груз начнет скользить равноускоренно. Для того чтобы движение груза было равномерным, необходимо уменьшить угол наклона грузонесущего элемента сразу же за погрузочным пунктом до величины $\beta = \operatorname{arctg} f$.

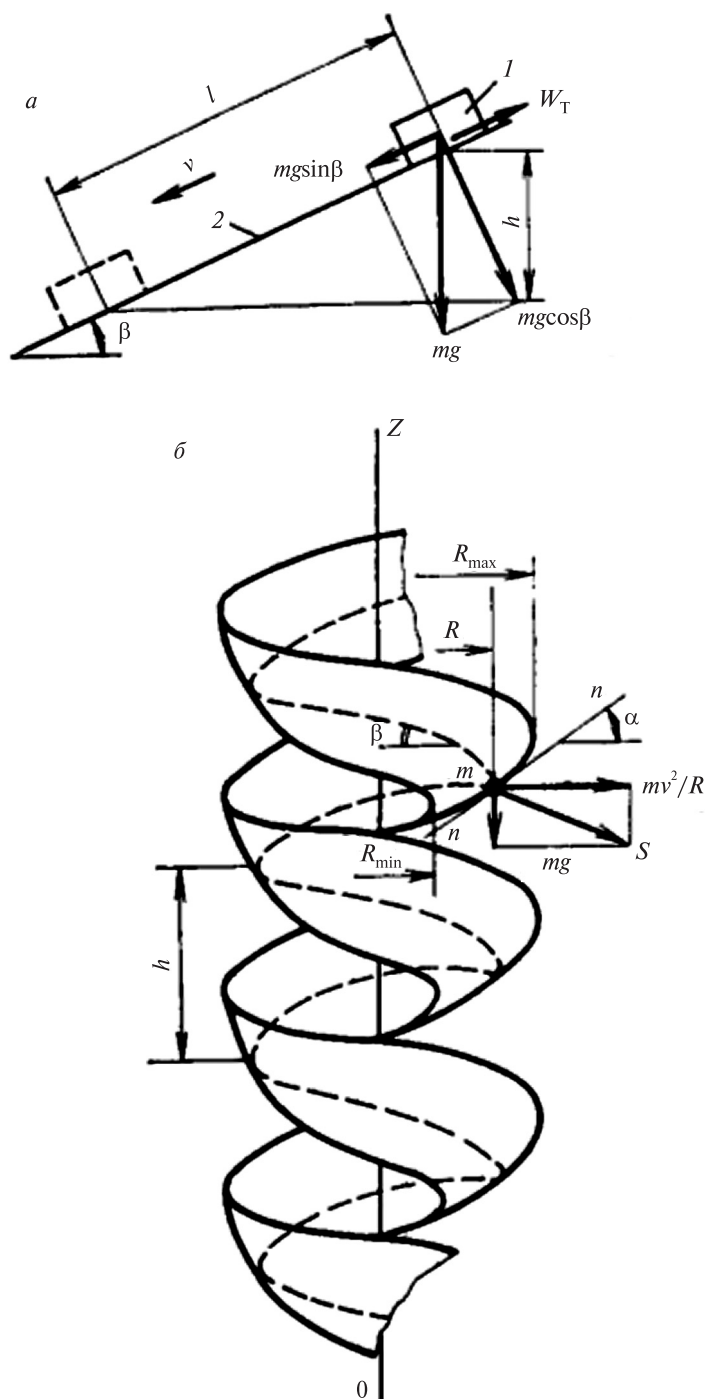


Рис. 1.9. Силы, действующие на частицу груза, скользящую:
a — по наклонной плоскости; *б* — по спиральному желобу