

Т. Ф. Подпорин

ТРАНСПОРТНЫЕ МАШИНЫ

Кемерово  
2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Т. Ф. ГОРБАЧЁВА»

Т. Ф. Подпорин

## **ТРАНСПОРТНЫЕ МАШИНЫ**

**Моделирование переходных режимов  
ленточных конвейеров**

Учебное пособие

Кемерово 2017

УДК 622.647.2.-001.57(075.8)

Рецензенты:

Кафедра безопасности и охраны труда Кемеровского регионального института повышения квалификации КемРИПК Минэнерго РФ (зав. кафедрой, профессор, канд. техн. наук, академик МАНЭБ В. В. Абрамов)

Главный научный сотрудник лаборатории угольного машиноведения Института угля СО РАН профессор, доктор технических наук Б. Л. Герике

Подпорин, Т. Ф. **Транспортные машины. Моделирование переходных режимов ленточных конвейеров** : учеб. пособие / Т. Ф. Подпорин ; КузГТУ. – Кемерово, 2017. – 162 с.  
ISBN 978-5-906888-67-9

Рассмотрены пять аварийных производственных ситуаций, произошедших в шахтных условиях на ленточных конвейерах, и даны разработанные на их основе пять кейсов. Приведены примеры решения конкретных производственных задач горного профиля с применением таких методов интерактивного обучения, как имитационно-игровое моделирование, моделирование производственных ситуаций и производственных процессов, и пример лекции-презентации, содержащей теоретический материал по эксплуатации горных машин с выводами математических формул и графическими зависимостями. На основании анализа аварийных ситуаций на конвейерах и проведённых исследований о влиянии формы провеса между роликотпорами на величину контрольного натяжения ленты предложены рекомендации для внесения в руководящие документы, связанные с эксплуатацией ленточных конвейеров.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 21.05.04 «Горное дело», специализации «Горные машины и оборудование», для специалистов предприятий горного профиля и проектных организаций, занимающихся вопросами эксплуатации ленточных конвейеров.

Печатается по решению редакционно-издательского совета КузГТУ.

УДК 622.647.2.-001.57(075.8)

© КузГТУ, 2017

ISBN 978-5-906888-67-9

© Подпорин Т. Ф., 2017

## Предисловие

Цель учебного пособия – способствовать процессу формирования компетентного специалиста для предприятий горного профиля. На настоящем этапе развития в шахтах Кузбасса применяется высокотехнологичная комплексная механизация и автоматизация производственных процессов, для эксплуатации которой нужны профессионально подготовленные специалисты, способные решать возникающие проблемы с творческим началом.

Процесс транспортирования горной массы от забоев до поверхности осуществляется ленточными конвейерами. Ленточный конвейер представляет сложную электромеханическую систему с распределёнными параметрами. Сложность работы её обусловлена фрикционным способом передачи тягового усилия от приводного барабана ленте и деформацией ленты под действием приложенных нагрузок. Указанные особенности находятся во взаимосвязи. Для создания необходимого сцепления между барабаном и лентой требуется предварительное натяжение ленты. Вопрос о величине контрольного натяжения ленты является центральным как на этапе выполнения проекта при определении основных параметров ленточного конвейера для конкретных условий работы, так и во время его эксплуатации в производственных условиях. Недостаточное натяжение ленты приводит к пробуксовкам её на приводном барабане (барабанах), а излишнее способствует возникновению порывов стыковых соединений ленты и сокращению срока службы подшипников направляющих барабанов. Определение контрольного значения натяжения ленты требует выполнения значительного объёма вычислений при высоком инженерном уровне расчётов.

В двухбарабанном и многобарабанном приводе конвейера могут возникать проблемы с распределением нагрузки между барабанами, приводящие к аварийной ситуации.

В общем случае транспортные системы шахт состоят из конвейеров, установленных в горизонтальных горных выработках, уклонах и бремсбергах. Если горизонтальные и уклонные конвейеры работают только в двигательном режиме, независимо от загруженности, то бремсберговые конвейеры могут работать в зависимости от загруженности в трёх режимах: двигательном, самоходном и тормозном (генераторном). Во время перехода из одного режима работы в дру-

гой у привода, в набегающей и сбегающей ветвях, происходит перераспределение усилий натяжения ленты. При этом может произойти потеря продольной устойчивости движения ленты на приводном барабане, и как следствие – возникает аварийная ситуация.

При раскросе шахтного поля для размещения выемочных столбов со сложной гипсометрией пласта продольный профиль конвейерного штрека может иметь вогнутый или выпуклый характер. При определении основных параметров конвейера для работы в таких выработках возникает необходимость проведения нескольких вариантов расчёта, связанных с выполнением многовариантного анализа и параметрической оптимизации. Без вычислительных программ практически невозможно выполнить ни определение значения контрольного натяжения ленты, для вычисления которого необходимо применение математического аппарата более высокого уровня (решение уравнений четвёртой и пятой степени), ни многовариантный анализ, ни параметрическую оптимизацию принятого технического решения.

Программный продукт, полученный в результате моделирования переходных режимов ленточных конвейеров, может применяться как для решения производственных задач, так и в учебном процессе при применении интерактивных методов обучения. На основе материала программного продукта определены темы для проведения различных видов занятий при применении следующих интерактивных методов обучения: имитационно-игровое моделирование; моделирование производственной ситуации и производственного процесса; презентация новой информации. Использование информационных компьютерных технологий способствует эффективному освоению рассматриваемых на занятии материалов.

В учебном пособии приведены примеры пяти аварийных ситуаций, произошедших на ленточных конвейерных установках в разных подземных горных выработках и в различное время. При поиске вариантов выхода из ситуации применяется кейс-метод, который является одним из интерактивных методов обучения. Сущность кейс-метода заключается в разборе конкретной производственной ситуации и поиске наилучшего варианта выхода из нее.

# **1. ЛЕНТОЧНЫЙ КОНВЕЙЕР (КОНВЕЙЕРНАЯ УСТАНОВКА) – СЛОЖНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА**

## **1.1. Общие сведения**

При наблюдении за работой ленточного конвейера у некоторых складывается впечатление, что это довольно простая установка, состоящая из движущейся по роликам ленты. Специалисты же утверждают, что ленточный конвейер представляет сложную электро-механическую систему. Сложность работы её обусловлена фрикционным способом передачи тягового усилия от приводного барабана ленте и продольной деформации ленты под действием приложенных нагрузок. Указанные особенности находятся во взаимосвязи. При деформации ленты происходит перераспределение соотношений усилий в набегающей и сбегаяющей ветвях ленты на приводе конвейера во время работы в переходных режимах, влияющее на фрикционную связь ленты с барабаном. Для получения необходимого сцепления между барабаном и лентой во всех режимах работы конвейера требуется соответствующее прижатие ленты к барабану. Последнее создаётся посредством предварительного натяжения ленты с помощью натяжного устройства (НУ).

Вопрос о натяжении ленты является центральным как в теории ленточных конвейеров, так и во время эксплуатации в производственных условиях. Натяжение ленты является основой физической сущности принципа его работы. Недостаточное натяжение ленты приводит к пробуксовкам её на приводном барабане (барабанах), а излишнее способствует возникновению порывов ленты, и в первую очередь на её стыках, приводит к сокращению срока службы подшипников направляющих барабанов. Основными отличиями конвейера от других типов машин являются значительная масса, распределённая по большой длине, и малая жёсткость тягового органа. Во время пуска и торможения конвейера возникают динамические составляющие в ветвях ленты, влияющие в той или другой степени на сцепление между приводным(и) барабаном(нами) и лентой и продольную устойчивость её движения.

В реальных условиях, в общем случае, ленточные конвейеры имеют различные длины (от 10 до 3500 м и более), устанавливаются

ся под различными углами наклона от  $+18^\circ$  до  $-16^\circ$  (с гладкой лентой), имеют производительность  $300 \div 5000$  т/ч и более. Оснащены конвейеры различными типами лент (резинотканевыми и резино-тросовыми, относительное удлинение которых при рабочей нагрузке на порядок меньше по сравнению с резинотканевыми лентами). Конвейеры могут иметь: различные типы НУ (жёсткие и автоматические); системы электропривода (с регулированием угловой скорости электропривода и без регулирования); системы торможения (с постоянным тормозным усилием и регулируемым). Уклонные конвейеры (транспортирующие груз вверх) дополнительно снабжены обратными остановами (роликовыми стопорами, храповыми устройствами).

Величина угла наклона конвейера предопределяет: значение натяжения ленты в характерных точках замкнутого контура; место расположения приводной станции и НУ; режим работы привода (двигательный и тормозной). При этом возникает необходимость для конкретных условий *выбрать*: тип конвейера и ленты для его оснащения, место расположения приводной станции (в головной части конвейера и хвостовой) и систему электропривода, место расположения НУ (в головной или хвостовой частях конвейера) и его тип; *определить*: установочную мощность электропривода, значение контрольного усилия натяжения ленты НУ, значение оптимального тормозного усилия, значение ускорения при пуске конвейера, время торможения и свободного выбега, значение замедления при экстренном торможении. Цель выбора основных элементов и определения основных эксплуатационных показателей – обеспечение нормальной работы конвейера во всех режимах (пуск, изменение загруженности в диапазоне от номинальной до нулевой и наоборот, торможение), при которой исключаются срыв сцепления ленты с приводным(и) барабаном(ами) и провес ленты между роликоопорами свыше допустимой нормы, обеспечиваются условия для удлинения срока службы ленты (за счёт снижения динамических нагрузок во время пуска конвейера и торможения, сведения до минимума возможности заштыбовки конвейеров в пунктах перегрузки в результате разницы выбегов смежных конвейеров при экстренных остановках конвейерной линии). Удлинение срока службы ленты имеет существенное значение, так как лента является основным наиболее дорогим и наименее долговечным элементом конвейера.

Стоимость её составляет около половины общей стоимости конвейерной установки [1, 2, 3], а в ряде случаев и более. Высокие амортизационные отчисления на ленту являются фактором, влияющим на экономическую эффективность конвейерного транспорта.

Для оценки статической устойчивости работы конвейерной установки необходимо располагать механическими характеристиками двигателя привода конвейера и непосредственно ленточного конвейера (при различной загруженности конвейера). Работа установки статически устойчива, если во время установившегося режима движения конвейера в точке равенства моментов двигателя и сопротивления движения конвейера (точка равновесия на механической характеристике двигателя) выполняется условие:  $\beta - \beta_c < 0$  [4, 5]. Здесь  $\beta$  и  $\beta_c$  – жёсткости механических характеристик двигателя и конвейера. При расположении точка равновесия в пределах рабочего участка механической характеристики двигателя обеспечивается устойчивая работа установки. При расположении точка равновесия в пределах нерабочего участка механической характеристики двигателя – неустойчивая работа.

Ниже приведено несколько случаев, имевших место в реальных условиях эксплуатации ленточных конвейеров, с которыми пришлось непосредственно разбираться автору работы.

В разное время на шахтах «Первомайская» и «Чертинская» (Кузбасс) автор принимал участие в обсуждении вопросов, связанных с нарушением устойчивой работы бремсберговых конвейеров, работающих при углах наклона близких к предельному углу. При увеличении загруженности конвейера в одних случаях скорость ленты опережала окружную скорость барабана, а других случаях конвейер начинал ускоренно двигаться и разгонялся. Очевидцы с шахты «Первомайская» рассказывали, что во время разгона конвейера наблюдалась большая скорость движения ленты; повышенный специфический (периодически скрежещущий) шум работающего конвейера, сопровождаемый массовым сбросом груза с ленты и большим пылеобразованием в выработке. Они утверждали, что обслуживающему персоналу, находящемуся в этот момент у конвейера, уберечься от сбрасываемого с конвейера груза было невозможно. Конвейер разгонялся, и выходила из строя механическая часть двигателя (ротор, подшипники). Сложившаяся производственная ситуация подробно рассматривается в прил. 1 (Кейс № 1).



Общеизвестно, что пробуксовка ленты на приводных барабанах ленточных конвейеров является причиной простоев [6, 7, 8 и др.], возникновения пожаров, сопровождаемых большими убытками, а иногда и человеческими жертвами. По результатам анализа пожары на ленточных конвейерах составляют 65 % от общего числа возникших пожаров. При этом 83 % пожаров приходится на ленточные конвейеры, расположенные в наклонных стволах, уклонах и бремсбергах, т. е. на конвейеры, работающие с большими нагрузками и повышенными скоростями движения ленты. Основной причиной возникновения пожаров является трение ленты о приводной барабан в режиме проскальзывания при перегрузках конвейера или при недостаточном натяжении ленты. Авторы работы утверждают, что в соответствии с полученной ими математической зависимостью в ближайшем будущем число загораний ленточных конвейеров от трения мало изменится [9]. За последние пять лет только на угольных шахтах Кузбасса зарегистрировано 36 подземных пожаров. Из них до 70 % возникли в выработках, оборудованных ленточными конвейерами, из-за возгорания ленты [10]. Первой из основных причин возникновения пожаров на ленточных конвейерах является нагрев ленты на приводном барабане из-за проскальзывания [11].

Автор, будучи вместе с главным инженером шахты дежурным по шахте «Капитальная-2» (Кузбасс), принял сообщение о появлении дыма на исходящей струе одного из участков. Было принято решение о спуске в шахту и следовании на аварийный участок со стороны свежей струи для установления характера аварии. К моменту прибытия автора на место аварии пожар уже развился и двигался навстречу свежей струе воздуха. Горящая выработка представляла огненную гудящую трубу, в которой горела резино-тканевая лента конвейера (выработка была сухая и закреплена деревом). Прибывшие горноспасатели приняли решение о возведении перемычек для изоляции участка, так как тушение пожара имеющимися средствами было неэффективно и небезопасно на сверхкатегорной шахте, опасной по газу и по пыли. Участок был изолирован и заилен. Причина пожара на участке не была установлена, но по одной из версий рассматривалось загорание ленты от её пробуксовки на приводном барабане.

Во время работы на шахте «Полысаевская-3» (Кузбасс) автору пришлось участвовать в тушении пожара, возникшего на одном из

горных участков на бремсберговом конвейере, с расположением привода в нижней части трассы, из-за пробуксовки ленты на приводном барабане.

Интересен факт возникновения пожара из-за пробуксовки ленты на приводном барабане на одном из мощных конвейеров транспортного комплекса разреза «Березовский-1» ПО «Красноярскуголь», произошедшего накануне приезда автора на разрез. Здесь подача угля от борта разреза до ГРЭС-1 осуществлялась пятью конвейерами общей длиной 14,86 км. Производительность конвейеров 4500 т/ч, скорость движения ленты 4 м/с. Конвейеры были оснащены резиноватросовой лентой типа РТЛ-5000 шириной 2000 мм [12]. Причиной возникновения пожара явилась течь воды через перекрытие над приводом, появившаяся во время дождя. При попадании воды на поверхность одного приводного барабана уменьшилась сила сцепления между лентой и барабаном. Но так как натяжение ленты оставалось прежним, то началась пробуксовка, приведшая к нагреву трущихся элементов (ленты и барабана) и последующему их возгоранию. Следует заметить, что коэффициент сцепления между лентой и барабаном  $\psi_{сц} = 0,70$  для сухой поверхности барабана и  $\psi_{сц} = 0,25$  для мокрой [13]. При указанных значениях коэффициента сцепления тяговый фактор привода в случае мокрой поверхности в 16 раз меньше, чем сухой (при угле обхвата лентой приводных барабанов  $\alpha = 360^\circ$ ).

Автору было предложено испытать разработанную и изготовленную вакуумную тормозную систему с экспоненциальным законом нарастания тормозного усилия и с отсечкой по замедлению на бремсберговом конвейере типа 1ЛБ100 (шахта «Чертинская» в Кузбассе), на котором имели место: частые порывы ленты; потеря лентой продольной устойчивости движения – «лента бежит»; постоянные завалы хвостовой части конвейера, принимающего грузопоток с конвейера 1ЛБ100. Конвейер имел угол наклона от  $-13^\circ$  в нижней части до  $-16^\circ$  в верхней части. Оснащён был тканевой лентой типа 2ШТК-200-2 с шестью прокладками и отрезком ленты длиной 200 м, имеющим четыре прокладки, вставленным в замкнутый контур из-за отсутствия ленты с шестью прокладками. Правомерность установки в контуре отрезка ленты с четырьмя прокладками обосновывалась следующими положениями. Во-первых, тем, что Руководством по эксплуатации подземных ленточных конвейеров [14]

допускается применение лент меньшей прочности, чем указано в руководстве по эксплуатации конвейера, если «производительность или фактическая длина конвейера меньше номинальных значений» и запас прочности ленты удовлетворяет нормативным требованиям. Во-вторых, отсутствием требования в Руководстве на запрещение использования в замкнутом контуре отрезков лент различной прочности. Сложившаяся производственная ситуация подробно рассматривается в прил. 2 (Кейс № 2).

На шахте «Чертинская» (Кузбасс) автор, во время проведения инструментальных замеров, связанных с исследованием торможения бремсбергового ленточного конвейеров при предельном угле наклона, по просьбе главного механика шахты произвел проверку распределения нагрузки между барабанами в двухбарабанном приводе с независимой связью на первом конвейере типа 2ЛУ100У01 в уклоне 7/5. Объект исследования имел длину 430 м, угол наклона 13°, оснащён был резинокросовой лентой типа 2РТЛО-1500. На обоих приводных блоках установлены электродвигатели типа ЭДК-5-5 с гидромуфтами. Обслуживающий персонал конвейера жаловался на систематический выход из строя на одном из приводных блоков то двигателя, то гидромуфты, то редуктора. При проведении инструментальных замеров было установлено, что на одном приводном блоке двигатель работает в двигательном режиме, а на другом – в генераторном. Сложившаяся производственная ситуация подробно рассматривается в прил. 3 (Кейс № 3).

После разъяснения автором сотрудникам отдела главного механика шахты сложившейся ситуации на конвейере в уклоне 7/5 (методом совмещения тяговых характеристик приводных блоков привода) главный механик шахты попросил еще сделать инструментальную проверку распределения нагрузки между барабанами в двухбарабанном приводе также с независимой связью между барабанами на первом конвейере типа 2ЛУ100У01, но в уклоне 11/3, так как освоение этого конвейера на полную нагрузку сдерживалось перегревом одного из двигателей. По причине перегрева двигателя приводной блок был отключен, и конвейер работал с одним блоком. Объект исследования имел длину 450 м, угол наклона 13°, оснащён резинокросовой лентой типа 2РТЛО-1500, и на обоих приводных блоках установлены электродвигатели типа ЭДК-5-5 с гидромуфтами. После включения в работу второго блока и проведения

замеров было установлено, что и здесь один двигатель работает в двигательном режиме, а второй – в генераторном. После проведённых замеров конвейер оставили в работе с включенными обоими приводными блоками. В конце третьей смены вышел из строя двигатель на первом блоке. Сложившаяся производственная ситуация подробно рассматривается в прил. 4 (Кейс № 4).

Ленточный конвейер типа ЗЛТА-1200, установленный на конвейерном штреке лавы 9В пласта Владимировского 2 на всю длину выемочного столба, имел прогиб в вертикальной плоскости (Кузбасс, ОАО «Шахта Южная»). Конвейер изготовлен ОАО «Анжеромаш», оснащён конвейерной лентой шириной 1200 мм. Производительность до 2000 т/ч при скорости движения ленты, равной 3,15 м/с. В процессе торможения конвейера лента собиралась в складки на наклонной части конвейера по направлению движения грузопотока вниз. При этом конвейер заштыбовывался грузом, сбрасываемым с ленты. Возникающие при этом простои конвейера сдерживали эффективную работу высокопроизводительной лавы, оснащённой комплексом фирмы DBT. Анализ сложившейся ситуации приведён в прил. 5 (Кейс № 5).

## 1.2. Механические характеристики. Переходные режимы

Конвейерные установки, транспортирующие грузы горизонтально и вверх (уклонные), работают только в двигательном режиме. При этом движущий момент  $M$ , создаваемый двигателем привода, положительный и расходуется на преодоление момента статического сопротивления движению  $M_c$  конвейера.

Эффективным методом при выявлении распределения нагрузок между приводными барабанами в двухбарабанном приводе с независимой связью между барабанами является метод совмещения тяговых характеристик приводных блоков привода ( $V = f(F_0)$ ). Тяговую характеристику одного блока привода получают в результате преобразования механической характеристики двигателя, представляющей зависимость угловой скорости  $\omega$  от вращающего момента  $M$  ( $\omega = f(M)$ ).

Режим работы конвейерной установки, транспортирующей груз вниз (бремсберговой), зависит от угла наклона конвейера  $\beta$

(град) и его загруженности  $q_k = q_g L$  (кг). Здесь  $q_g$  (кг/м) – расчётная масса груза на ленте, приведённая к одному метру длины конвейера  $L$  (м). При этом номинальной загруженности  $q_{k.ном}$  (кг) соответствует равенство  $q_{k.ном} = q_{g.ном} L$ , в котором значение  $q_{g.ном}$  определяется по паспортной максимальной производительности конвейера. Имеется угол наклона конвейера, при котором во время работы с номинальной загруженностью  $q_{g.ном}$  угловая скорость  $\omega$  вала двигателя привода равна синхронной  $\omega_c$ , а момент на валу двигателя равен нулю. Эти условия обеспечиваются благодаря действию движущего момента, создаваемого неуравновешенной составляющей веса груза на ленте, передаваемого механически на вал двигателя. При работе в этом режиме активная мощность на валу двигателя равна нулю. Этот угол наклона конвейера будем называть углом нулевой мощности. В этом случае двигатель привода потребляет из сети только реактивную мощность для возбуждения. В интервале изменения значений угла наклона от нуля до угла нулевой мощности установка работает в двигательном режиме независимо от загруженности.

Режим работы конвейерной бремсберговой установки определяется только загруженностью конвейера в интервале изменения угла наклона конвейера от угла нулевой мощности до максимально допустимого ( $\beta = -16^\circ$ ). При определённой загруженности конвейера, под действием веса груза на ленте, угловая скорость двигателя становится равной синхронной и момент на валу двигателя равным нулю. При этом двигатель работает в режиме идеального холостого хода. В случае дальнейшего увеличения значения загруженности угловая скорость двигателя превышает синхронную скорость. При этом двигатель работает в тормозном режиме с отдачей энергии в сеть и создаваемый им тормозной момент уравнивает движущий статический момент, создаваемый неуравновешенной составляющей веса груза на ленте.

На рис. 1.1 изображены механические характеристики 1 асинхронного двигателя ( $\omega = f(M)$ ) привода конвейера с критическими значениями моментов в двигательном режиме  $M_{к.д}$  и генераторном  $M_{к.г}$ , и непосредственно конвейера 2 и 3 ( $\omega = f(M_c)$ ): 2 – при холостом ходе; 3 – при номинальной загруженности. Механи-

ческая характеристика ленточного конвейера представляет прямую, параллельную оси ординат, так как статический момент сопротивления конвейера в пределах его рабочих скоростей изменяется незначительно. Это положение базируется на теоретических и экспериментальных исследованиях, в соответствии с которыми у конвейера основным моментом сопротивления является момент трения, который в пределах рабочих скоростей изменяется мало. Момент трения препятствует движению, всегда направлен против движущего момента привода и изменяет свой знак при изменении направления вращения. На рис. 1.1, *а* статические моменты сопротивления конвейера  $M_{с.хх}$  и  $M_{с.н}$  соответственно при холостом ходе и номинальной загруженности, приведённые к валу двигателя, изображены во втором квадранте, имеют отрицательный знак. Для удобства определения точки равновесия моментов (рабочей точки) двигателя и статического сопротивления движению конвейера механические характеристики двигателя и конвейера изображаются в одном квадранте. При двигательном режиме работы конвейерной установки используют первый квадрант. В точках 4 и 5 имеет место равновесие моментов двигателя и конвейера соответственно при холостом ходе конвейера  $M_{хх} = M_{с.хх}$  и номинальной его загруженности  $M_{н} = M_{с.н}$ . Равновесное состояние конвейера изменяется в интервале между точками 4 и 5 при изменении загруженности в интервале от нуля до номинальной загруженности. При этом угловая скорость двигателя меньше синхронной скорости и изменяется от  $\omega_{хх}$  (в точке 4) до  $\omega_{н}$  (в точке 5).

На рис. 1.1, *б* статический момент сопротивления конвейера  $M_{с.хх}$  при холостом ходе также изображён во втором квадранте, а статический момент сопротивления конвейера  $M_{с.н}^T$  при номинальной загруженности конвейера – в первом квадранте. В данном случае  $M_{с.н}^T$  является движущим моментом, имеет положительный знак и обусловлен действием неуравновешенной составляющей веса груза на ленте. При изменении загруженности конвейера в интервале от нуля до номинального значения равновесное состояние изменяется в интервале между точками 4 и 5. При этом точка 5 находится во втором квадранте, двигатель вращается с угловой

скоростью  $\omega_{\text{H}}^{\Gamma}$ , выше синхронной. Движущий момент конвейера  $M_{\text{с.н}}^{\text{T}}$  уравновешивается тормозным моментом  $M_{\text{H}}^{\Gamma}$  двигателя, создаваемым при работе в генераторном режиме. Загруженность конвейера, соответствующая синхронной угловой скорости двигателя  $\omega_{\text{с}}$ , равна синхронной загруженности. При случайном характере грузопотока, поступающего на бремсберговую конвейерную установку, последняя может находиться в одном из возможных равновесных состояний в интервале между точками 4 и 5.

К переходным режимам конвейера относятся: процессы загрузки и разгрузки; режимы пуска и торможения. Длительность переходного режима в процессе загрузки (или разгрузки) конвейера велика, а изменение скорости ленты незначительно, так как определяется большой жёсткостью рабочего участка механической характеристики асинхронного двигателя привода. При этом при моделировании процесса разгрузки и загрузки конвейера эти переходные режимы рассматривают как ряд установившихся (равновесных) режимов с различной по величине и длине ленты нагрузкой, приходящейся на один метр [15, 16, 17].

Длительность протекания переходных процессов в механической системе ленточного конвейера значительно больше длительности протекания переходных электромагнитных процессов в асинхронных двигателях. Поэтому принято при моделировании пуска использовать механическую характеристику двигателя [18, 19].

При математическом описании пускового процесса конвейера с короткозамкнутым двигателем и гидромuftой (или электромагнитной муftой скольжения – ЭМС) используют статическую механическую характеристику двигателя и пусковую характеристику гидромuftы (или ЭМС). Описание механической характеристики двигателя с фазным ротором определяется пусковой характеристикой двигателя.

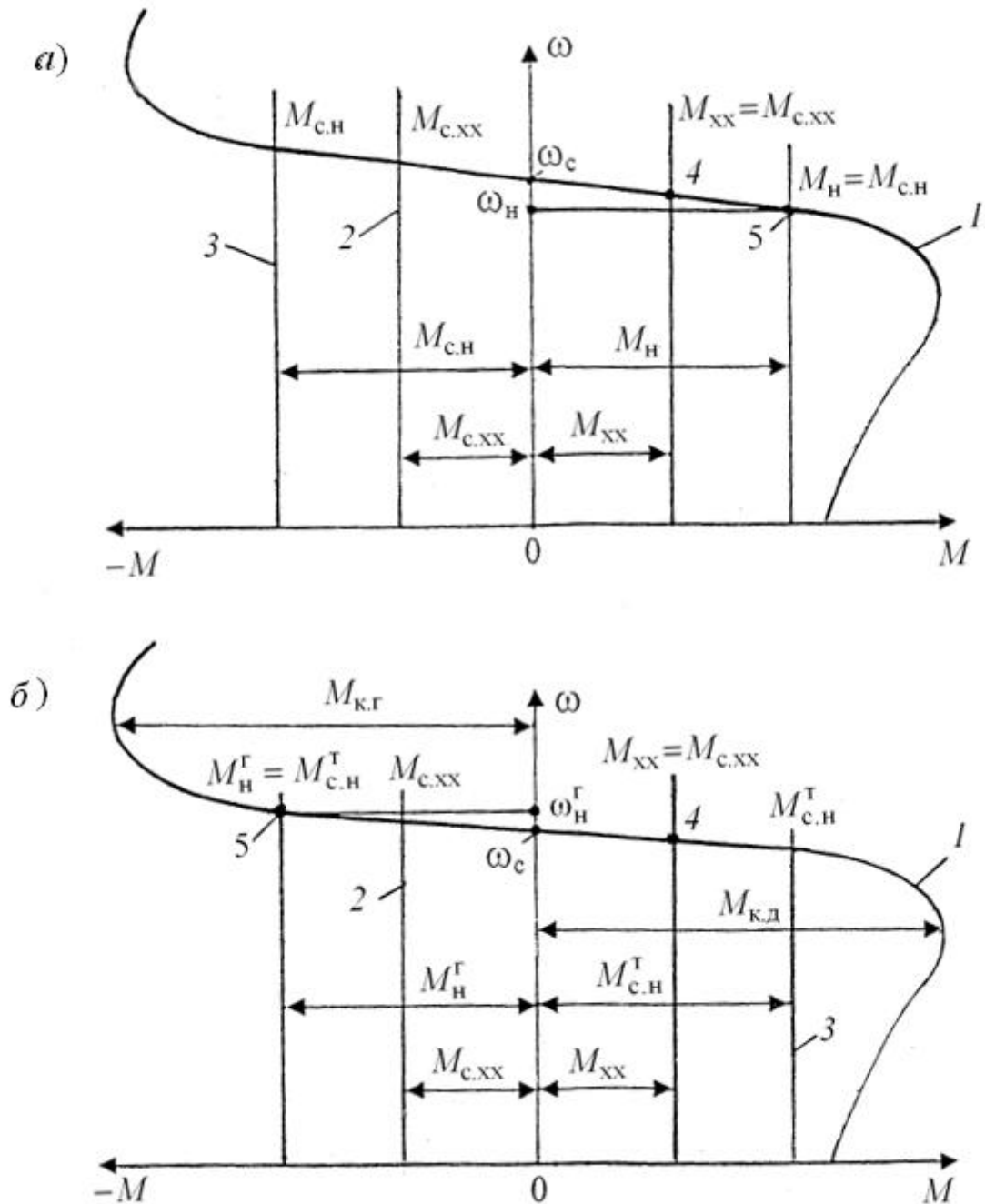


Рис. 1.1. Механические характеристики конвейерной установки:  
 а – горизонтальная, уклонная; б – транспортирующая груз вниз (бремсберговая); 1 – механическая характеристика двигателя привода; 2 и 3 – механическая характеристика конвейера при холостом ходе и номинальной загрузке; 4 и 5 – точки равновесия моментов двигателя и конвейера при холостом ходе и номинальной загрузке



Пуск конвейера, представляющего собой сложную электромеханическую систему с распределёнными параметрами, сопровождается возникновением в ленте волновых процессов, которые описываются волновым уравнением (уравнением в частных производных) [15]. При пуске лента движется с переменной скоростью в период разгона. При этом нестационарном процессе в ленте могут возникать динамические усилия, приводящие к пробуксовке ленты на приводных барабанах и вызывающие в ней перегрузки. Протекание процесса пуска зависит от характера самого пуска, типа привода, типа натяжного устройства и т. д. Пуск сопровождается несколькими взаимосвязанными физическими явлениями (например, распространение продольных волн вдоль ленты и пробуксовка). Исследованию процесса пуска ленточного конвейера посвящены работы [18, 20, 21 и др.]. Описывается пуск системой дифференциальных уравнений движения ленточного конвейера, аналитическое решение которых представляет сложную трудоёмкую и практически неразрешимую задачу. И. В. Запенин утверждает, что «лишь в некоторых частных случаях при определённых допущениях удаётся качественно оценить характер переходных процессов на небольшом начальном участке переходного режима» [18]. Использование вычислительных и, в частности, аналоговых вычислительных машин (АВМ) позволяет рассматривать несколько взаимосвязанных процессов [20].

Решение волнового уравнения с учётом прямых, преломлённых и отражённых волн приводит к усложнению выражений для определения динамических составляющих натяжения ленты при пуске. Из теоретических и экспериментальных исследований известно, что при наличии положительного затухания волн экстремальные величины натяжения наступают в момент первого максимума. На основании этого принято расчёт вести на максимальные усилия в режиме пуска. Для определения амплитудных значений натяжения необходимо знать момент времени достижения экстремальных значений динамических составляющих, по которому необходимо вести расчёт.

В общем случае время пуска  $t_{\Pi}$  (с) определяют по формуле

$$t_{\Pi} = t_{\text{Тр}} + t_{\text{рк}}, \quad (1.1)$$

где  $t_{\text{тр}}$  – время фазы трогания ленты (время процесса вовлечения ленты в движение);  $t_{\text{рк}}$  – время разгона конвейера до номинальной скорости.

За время  $t_{\text{тр}}$  все точки ленты должны прийти в движение, и создаётся по контуру ленты диаграмма натяжения, соответствующая установившемуся режиму. Такая диаграмма создаётся двигателем путём плавного увеличения его момента до значения, близкого к значению статического момента в установившемся режиме. Если направление сил трения перед пуском соответствует направлению движения ленты (наклонные конвейеры), то время фазы трогания ленты выделять нет основания [22].

Процесс пуска при определённых допущениях достаточно подробно изложен в работах [3, 15, 22, 23 и др.]. Определение динамических усилий, возникающих в ленте при пуске, является конечной целью решения волнового уравнения, описывающего колебания ленты в процесс пуска. Динамическое усилие в любом сечении  $x$  по длине ленты в процессе распространения прямой волны определяют по выражению [15, 23]

$$S_{\text{дин}}(t, x) = C \rho v = C \rho \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_x, \quad (1.2)$$

где  $C$  – скорость распространения фронта волны продольной деформации в ленте при условии, что в ней предварительно создано статическое натяжение (нормативный провеса ленты между ролик-кооперами), м/с;  $\rho$  – плотность ветви ленты, в которой определяется усилие, кг/м;  $v$  – скорость смещения сечения ленты (при пуске эта скорость совпадает по величине с текущей скоростью сечения, при торможении – это разность между установившейся и текущей скоростями сечений), м/с;  $u$  – смещение сечения ленты в сечении  $x$  по длине ленты (абсолютная деформация), м.

Скорость  $C$  определяют в соответствии с рекомендациями работ [3, 15, 16] по формулам:

верхней ветви

$$C_1 = \sqrt{\frac{E_{\text{о.д}}}{\rho_{\text{н}}}}; \quad (1.3)$$

нижней ветви

$$C_2 = \sqrt{\frac{E_{o.d.}}{\rho_H}}, \quad (1.4)$$

где  $E_{o.d.}$  – продольная жёсткость ленты, определяемая с использованием значения динамического модуля упругости материала ленты, Н.

Приведённая плотность  $\rho$  ветвей ленты:  
загруженной верхней

$$\rho_{вг} = q_{г} + q_{л} + q_{р}'; \quad (1.5)$$

незагруженной верхней

$$\rho_{вн} = q_{л} + q_{р}'; \quad (1.6)$$

нижней ветви

$$\rho_{н} = q_{л} + q_{р}'' \quad (1.7)$$

В соответствии с (1.2) динамическая составляющая  $S_{дин}(t, x)$  прямо пропорциональна скорости смещения сечения. Следовательно, динамическое натяжение в точке набегания ленты на приводной барабан в процессе распространения прямой волны пропорционально скорости в этой точке:

$$S_{нб.д} = C_1 \rho_{в} V_{нб}. \quad (1.8)$$

Таким образом, для определения динамической составляющей натяжения в точке набегания ленты на приводной барабан, где она максимальна, достаточно определить при пуске закономерность изменения линейной скорости обода барабана при условии отсутствия пробуксовки и допущении, что волновое сопротивление  $C_1 \rho_{в} = \text{const}$ .

В работах [3, 15, 22, 23] при определении динамических натяжений в ленте приняты следующие допущения:

1. Трансмиссионные валы и муфты абсолютно жёсткие.
2. Масса привода приведена к ободу приводного барабана.
3. Масса привода фрикционно связана с лентой, причём пробуксовка ленты на барабане отсутствует. При этом скорость набегания ленты на приводной барабан  $V_{нб}$  равна скорости сбегания её

с приводного барабана  $V_{сб}$  и равна скорости приведённой массы привода.

4. Масса груза и вращающихся частей роlikоопор является равномерно распределённой.

5. Движение ленты и груза совместное; проскальзывание ленты относительно роликов отсутствует.

6. Сила сопротивления движению конвейера не зависит от скорости движения ленты.

7. Продольная деформация ленты происходит по закону Гука.

8. Волновое сопротивление  $C_1 \rho_B = \text{const}$ .

Расчёты показывают, что при принятых допущениях динамические натяжения всегда пропорциональны избыточному усилию.

Положим, что на основании результатов моделирования, полученных из условия устранения пробуксовки ленты при значении  $C_1 \rho_B = \text{const}$ , подобраны: характеристика привода; тип натяжного устройства; натяжение ленты в установившемся режиме и в предпусковом периоде; значение действительного тягового фактора привода. Утверждать, что при данных параметрах конвейерная установка будет работать в условиях эксплуатации, не реально. Дело в том, что горные грузопотоки имеют случайный характер [3, 24], и пуск конвейера происходит при неопределённости статического момента сопротивления движению, зависящего от загруженности конвейера  $q_k$  (кг). Загруженность, в общем случае, может изменяться в интервале от значения  $q_k = q_G L = 0$  до  $q_k = q_{Г.ном} L$ , соответствующего номинальной загруженности. При этом под действием избыточного усилия, развиваемого приводом, могут возникать пробуксовка ленты на барабане и значительные динамические усилия. Пуск же конвейера в условиях эксплуатации – явление нередкое.

Частота остановок конвейеров, так же как и горных грузопотоков, имеет случайный характер. В соответствии с проведёнными исследованиями среднее время между последовательными остановками конвейеров в подземных условиях составляет 43,2 мин. При этом экстренные (аварийные) имеют преобладающее значение [25]. В условиях открытых горных разработок дробильно-конвейерные комплексы останавливаются почти в 25 % случаев из-за срабатывания аппаратуры контроля [7].

При случайном характере горных грузопотоков и остановок конвейеров пуск их после случайной остановки производится в условиях неопределённости статического момента сопротивления движению. Следовательно, для устранения при пуске избыточного усилия больше допустимого значения схема управления приводом должна быть адаптивной, т. е. приспосабливаться к условиям неопределённости момента сопротивления движению, обеспечивать плавный пуск конвейера без пробуксовки и устранять возможность порыва ленты. Наиболее соответствуют выполнению этих условий системы управляемого электропривода в функции ускорения и привода с гидромуфтой, управляемой наполнением при помощи электронного регулятора.

В настоящее время для обеспечения плавного пуска ленточного конвейера рекомендуются системы регулируемого электропривода разного уровня сложности. Описание некоторых из них приведено в работах [12, 26 и др.]. То есть вопрос регулируемого пуска ленточных конвейеров решается с использованием технических средств различной сложности и на определённом уровне с учётом конкретных условий работы конвейеров и их характеристик (угол наклона, длина, скорость движения ленты, производительность и т. д.).

Моделирование пуска конвейера в работе не рассматривается из-за ограниченного её объёма и практической направленности пособия. При этом студентам предлагается на основе приведённых в работе программ самостоятельно составить вычислительную программу для пуска конвейера, используя математические зависимости, описывающие пуск при определённых допущениях, приведённых в работах [3, 22, 23 и др.].

Практическая направленность работы заключается в реализации математических зависимостей, описывающих переходные режимы конвейерной установки в виде отлаженных вычислительных программ для работы на ПЭВМ, и использовании в учебном процессе этих программ при параметрической оптимизации и многовариантном анализе технических решений, на основании результатов которого принимается оптимальный вариант.

С другой стороны, практическая направленность работы связана с рассмотрением тех переходных режимов, результаты исследования которых принимают в качестве расчётных значений для конкретной установки и в конкретных условиях работы, без кото-

рых нельзя обойтись, то есть без них нет решения рассматриваемого вопроса. Например, исследование процесса изменения натяжения ленты во время процесса разгрузки груза конвейерной установкой с жёстким натяжным устройством, оснащённой резинотросовой лентой, сводится к определению значения натяжения ленты в месте установки натяжного устройства при холостом ходе. Это значение принимают за контрольное значение натяжения, при котором обеспечивается без пробуксовки ленты работа установки в интервале изменения её загруженности от нуля до номинальной загруженности. Определённое значение контрольного натяжения правомерно устанавливать только при работе в конкретных условиях и для конкретного конвейера. При изменении условий работы конвейера (например, увеличение угла наклона) определяют значение контрольного натяжения ленты для новых условий работы.

Ещё пример – вопрос останова конвейеров в линии за одинаковое время для исключения пересыпки пунктов перегрузки при экстренной остановке (отключении электроэнергии). В общем случае конвейерная линия может состоять из коротких и длинных, а также горизонтальных и наклонных конвейеров по восстанию и падению, т. е. конвейеров с очень различающимся временем выбега по инерции. Загруженные короткие и восстающие (уклонные) конвейеры останавливаются за несколько секунд. Горизонтальные конвейеры большой длины, в зависимости от длины и загруженности, обладают большой кинетической энергией, и поэтому продолжительность времени их выбега составляет 30–40 с, а в ряде случаев и более. Грузёные конвейеры по падению (бремсберговые) обладают движущим моментом и сами не остановятся в случае поступления на них груза. Если принять, что длинный конвейер с временем выбега 40 с транспортирует груз на короткий перегрузочный конвейер с временем выбега 5 с и оба одновременно отключаются от электрической сети, то длинный перегружает груз на остановившийся короткий в течение 35 с. Нужно предотвратить подобные пересыпки или сократить их до минимума. Одна из возможностей – торможение длинных конвейеров. При торможении проявляются особенности привода ленточного конвейера: фрикционный способ передачи тягового усилия от барабана ленте и деформация ленты.

Исследование процесса торможения конвейеров при остановке конвейерной линии сводится к определению времени выбега

каждого конвейера в зависимости от его загруженности, так как при случайном характере горных грузопотоков загруженность их не известна на момент времени случайной остановки. При этом определяют для каждого конвейера допустимое значение тормозного усилия (постоянного во времени) из условия устранения пробуксовки ленты на барабане. После этого анализируют время выбега каждого конвейера в линии, и если в результате анализа будет выявлена разница во времени выбегов конвейеров, при которой происходит переполнение вместимости перегрузочного устройства, то приступают к поиску путей и средств по выравниванию времени остановки конвейеров. Дело в том, что в настоящее время нет адаптивных тормозных систем ленточных конвейеров, приспособляющихся к неопределённости статического момента сопротивления движению и нормально функционирующих после случайного отключения электроэнергии. Имеются только отдельные разработки регулируемых тормозных систем. В работе [27] отмечается, что управление замедлением конвейеров при остановке и управление ускорением при пуске важны в равной мере. Заметим, что пуск, как переходный режим ленточного конвейера, реален только при наличии электроэнергии, а торможение при экстренных остановках происходит при её отсутствии.

В данной работе подробно рассматривается вопрос моделирования переходных режимов, описывающих процессы разгрузки и загрузки при работе двигателя на рабочей части механической характеристики, необходимые для определения значения контрольного натяжения ленты конвейера.

Вопрос моделирования процессов торможения конвейера: при свободном выбеге (за счёт сил трения в движущейся системе); нормативное торможение; экстренное (аварийное) торможение – изложен в работе [28].

Расчётом режима пуска предусматривается определение времени пуска. В связи с тем, что непосредственное измерение динамических усилий вызывает значительные затруднения, контроль времени пуска и торможения часто является фактором, позволяющим оценить соответствие фактических и расчётных характеристик привода [24]. При расчёте времени пуска пренебрегают колебаниями скорости массы привода относительно центра тяжести всей системы, так как эти колебания малы. При этом рассматривают всю систему

как жёсткую и характеризуют её приведённым к валу двигателя (для удобства расчётов) моментом инерции всех вращающихся и поступательно движущихся масс [15, 22, 23]. Для определения времени пуска и торможения используют уравнения динамического равновесия конвейерной установки в представленном ниже виде.

### 1.3. Уравнение динамического равновесия

Рассматриваемые уравнения записаны в предположении, что во время переходного процесса моменты инерции  $J$  всех вращающихся и поступательно движущихся масс, двигателя  $M$ , сопротивления движению  $M_c$  и тормозной  $M_T$  являются постоянными. По известным значениям моментов определяется характер движения конвейерной установки, время переходного режима.

Процесс разгрузки (загрузки) конвейера при работе двигателя на рабочем участке механической характеристики описывается в общем случае уравнениями:

при работе установки в двигательном режиме

$$+M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}; \quad (1.9)$$

при работе в тормозном режиме

$$-M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.10)$$

Так как изменение скорости двигателя при работе на рабочем участке механической характеристики незначительно, то ускорением системы пренебрегают (номинальное скольжение асинхронных двигателей, применяемых на ленточных конвейерах, составляет 1,0÷2,5 % [29, 30]). При этом динамический (инерционный) момент (правую часть) в уравнениях (1.9), (1.10) не учитывают при исследовании переходных процессов в ленте конвейера. Полагают, что граница раздела гружёной и порожней частей верхней ветви движется со скоростью транспортирования груза  $V$  (м/с) и при значении текущего времени  $t$  (с) определяется координатой  $l = Vt$  [31].



Для процесса торможения конвейера только за счёт сил трения в движущейся системе (свободный выбег) при работе перед торможением:

в двигательном режиме

$$-M_c = J \frac{d\omega}{dt}; \quad (1.11)$$

в тормозном режиме

$$+M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.12)$$

Для процесса торможения с приложением тормозного момента при работе перед торможением:

в двигательном режиме

$$-M_T - M_c = J \frac{d\omega}{dt}; \quad (1.13)$$

в тормозном режиме

$$-M_T + M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.14)$$

Пуск конвейера, работавшего перед остановкой:

в двигательном режиме

$$+M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}; \quad (1.15)$$

в тормозном режиме

$$+M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.16)$$

В общем случае приведённые уравнения могут быть записаны в следующем виде.

Уравнения (1.9) и (1.10):

$$\pm M \mp M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.17)$$

Уравнения (1.11) и (1.12):

$$\mp M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.18)$$

Уравнения (1.13) и (1.14):

$$-M_T \mp M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.19)$$

Уравнения (1.15) и (1.16):

$$+M \mp M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.20)$$

В уравнениях (1.9)–(1.16) приняты следующие обозначения:  $M$ ,  $M_c$  и  $M_T$  – моменты (Н · м) соответственно двигателя привода конвейера, статического сопротивления движению конвейера и тормозной;  $J$  – суммарный, приведённый к валу двигателя момент инерции вращающихся и поступательно движущихся масс конвейерной установки, кг · м<sup>2</sup>;  $d\omega/dt$  – угловое ускорение (замедление) конвейера с<sup>-2</sup>, приведённое к валу двигателя;  $J \frac{d\omega}{dt}$  – инерционный (динамический) момент конвейерной установки, приведённый к валу двигателя. Вращающий момент, развиваемый двигателем при работе, принимается положительным, если он направлен в сторону движения ленты. Если он направлен в обратную сторону движения, то он считается отрицательным. Инерционный момент, как по значению, так и по знаку, определяется алгебраической суммой момента двигателя и момента сопротивления. Выбор знаков перед значениями моментов зависит от режима работы двигателя и характера момента сопротивления.

Уравнение (1.19) при оптимизации тормозного момента в случае расположения тормоза на быстроходном валу редуктора предпочтительнее по сравнению с уравнениями равновесия сил. Используя уравнения (1.17)–(1.20), достаточно просто определить время пуска, торможения и свободного выбега конвейера.

Как нельзя остановить за несколько секунд на расстоянии нескольких метров скорый поезд, так нельзя остановить за несколько

секунд длинный конвейер. При оперативной остановке конвейера тормоза накладываются после снижения скорости ленты до значения  $10\div 20\%$  от номинальной [27, 28] с целью исключения потери устойчивости ленты при торможении. Однако при угрозе жизни человека или опасности повреждения ленты инородным телом следует тормоза накладывать без задержки после отключения привода от электросети. При этом происходит экстренное (аварийное) торможение. Тормоза также накладываются без задержки при отключении напряжения с конвейерной установки (линии) в результате срабатывания электрических защит (защиты от тока утечки, максимальной токовой защиты, защит от падения напряжения и перенапряжения в питающей линии) и из-за срабатывания аппаратуры контроля (например, при сходе ленты в сторону).

На стадии проектирования конвейерной линии должны быть проанализированы режимы свободного выбега, режимы оперативного торможения с приложением тормозного момента и рассчитан режим экстренного (аварийного) торможения конвейеров [22, 23].

При исследовании переходных режимов в работе использованы тяговые характеристики конвейерной установки: привода, непосредственно конвейера.

#### 1.4. Тяговые характеристики

Статическая тяговая характеристика привода представляет собой зависимость линейной скорости обода приводного барабана  $V$  (м/с) от передаваемого им тягового (тормозного) усилия  $F_0$  (Н) ( $V = f(F_0)$ ). Статическая силовая характеристика непосредственно конвейера представляет зависимость скорости движения ленты  $V_{\text{л}}$  от силы сопротивления движению ленты  $W_{\text{ст}}$  (Н) ( $V_{\text{л}} = f(W_{\text{ст}})$ ) (рис. 1.2). Усилие  $F_0$  создаётся двигателем, а сила  $W_{\text{ст}}$  равна алгебраической сумме всех сил сопротивления движению на конвейере. При работе конвейера линейная скорость барабана равна скорости движения ленты ( $V = V_{\text{л}}$ ).

Тяговую характеристику привода получают в результате преобразования механической характеристики двигателя  $\omega = f(M)$ .

Построение тяговой характеристики производим следующим образом.

Определяем синхронную скорость движения ленты  $V_c$ , соответствующую синхронной угловой скорости двигателя  $\omega_c$ , по формуле

$$V_c = \omega_c R_{\zeta} / i, \quad (1.21)$$

где  $R_{\zeta}$  и  $i$  – соответственно радиус приводного барабана (м) и передаточное число редуктора.

Определяем номинальную скорость движения ленты конвейера по формулам:

при двигательном режиме

$$V_H = V_c (1 - S_H); \quad (1.22)$$

при тормозном режиме

$$V_H^T = V_c (1 + S_H), \quad (1.23)$$

где  $S_H$  – номинальное скольжение двигателя.

Значение  $S_H$  двигателей, применяемых на ленточных конвейерах, составляет  $0,01 \div 0,025$  [29, 30].

Определяем тяговое (тормозное) усилие на приводном барабане, создаваемое двигателем:

при двигательном режиме

$$F_{o.H} = \frac{M_H}{R_{\zeta}} i \eta; \quad (1.24)$$

при тормозном режиме

$$F_{o.H}^T = \frac{-M_H}{R_{\zeta}} i \eta, \quad (1.25)$$

где  $\eta$  – КПД привода, учитывающий потери в передаче от вала двигателя до вала приводного барабана ( $\eta = 0,87 \div 0,92$ ) [13].

Откладываем на оси ординат значение синхронной скорости  $V_c$ , определённое по формуле (1.21).

Полученную точку обозначаем  $V_c$ . Располагая значениями  $V_H$  и  $F_{o.H}$ , определёнными по формулам (1.22) и (1.24), ставим на

плоскости системы координат в первом квадранте точку  $D(F_{0.н}, V_н)$  (рис. 1.2, а). Соединив прямой линией точки  $V_c$  и  $D$ , получим рабочий участок тяговой характеристики привода 1. Располагая значениями  $V_н^T$  и  $F_{0.н}^T$  определёнными по формулам (1.23) и (1.25), ставим на плоскости системы координат во втором квадранте точку  $G(F_{0.н}^T, V_н^T)$  (рис. 1.2, б). Соединив прямой линией точки  $V_c$  и  $G$ , получим рабочий участок тяговой характеристики привода 1 при работе в тормозном режиме.

Силовые характеристики конвейера изображены в виде прямых линий 2, 3, параллельных оси ординат. Это следует понимать так, что с увеличением скорости движения ленты алгебраическая сумма всех сопротивлений на конвейере остаётся постоянной. Статические силы сопротивления перемещению всех подвижных частей ленточного конвейера практически не зависят от скорости. Они зависят от многих факторов и не являются постоянными в процессе работы конвейера, поэтому их определяют для конкретных условий. При скорости движения ленты больше 3 м/с корректируют принятое для данных условий среднее значение коэффициента сопротивления движению ленты по роликам при определении статического сопротивления движению, учитывая при этом и температуру окружающей среды [3, 22, 32].

При построении точек равновесия тягового усилия привода и силы сопротивления движению конвейера выполняется правило знаков, принятое для моментов в п. 1.2. Точки 4 и  $D$  равновесия сил соответственно при холостом ходе и номинальной загрузке конвейера располагаются всегда в первом квадранте в случаях работы конвейеров только в двигательном режиме (горизонтальные, уклонные и бремсберговые при углах наклона, которые меньше угла нулевой мощности). При этом во втором квадранте располагаются силовые характеристики 2, 3 конвейера, определяемые значениями статических сопротивлений конвейера  $W_{ст.хх}$  и  $W_{ст.н}$  соответственно при холостом ходе и номинальной загрузке. В дальнейшем любую загрузку конвейера в интервале от нуля до номинальной загрузке будем называть частичной и обозначать на тяговой характеристике точку равновесия сил символом  $a_p$  (рабочая точка).

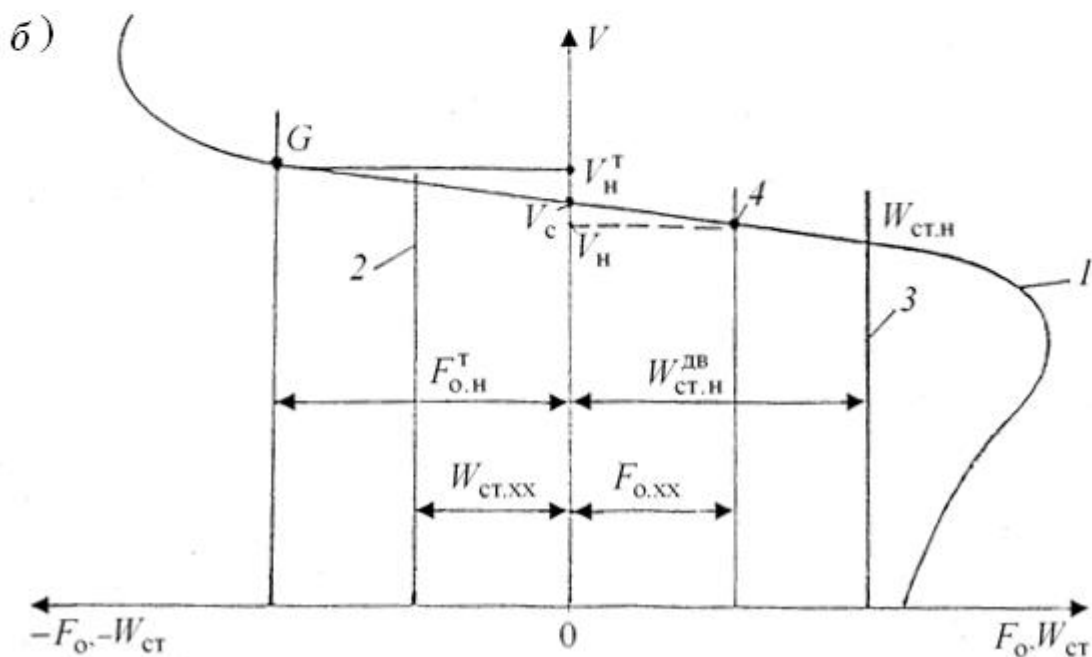
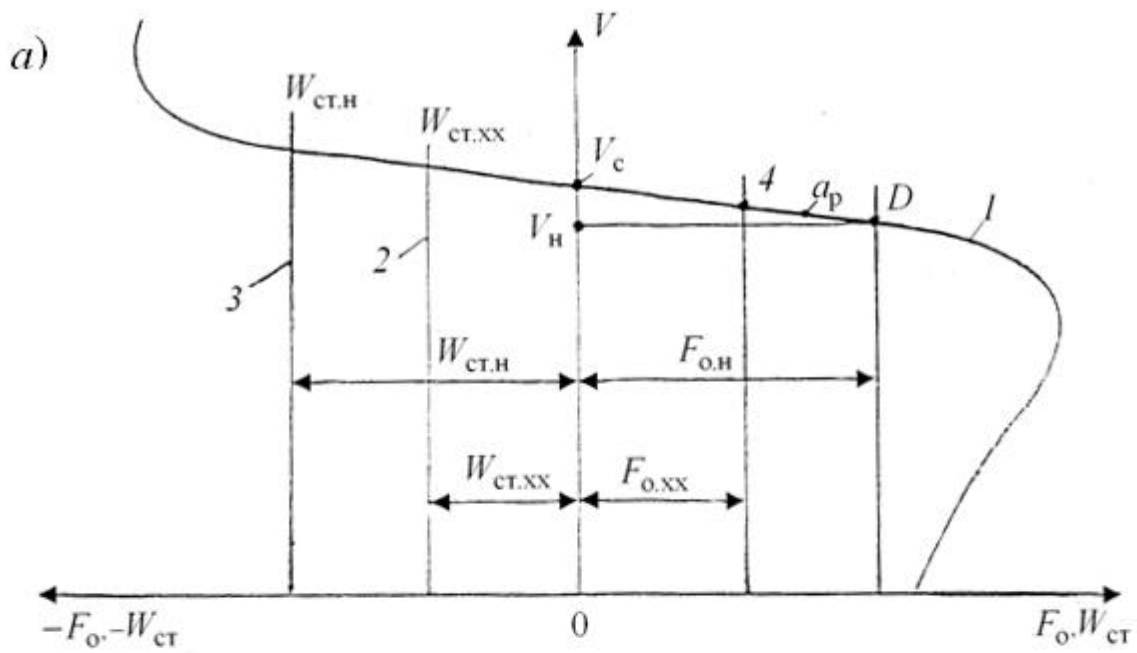


Рис. 1.2. Тяговые характеристики конвейерной установки:  
*а* – горизонтальная, уклонная; *б* – транспортирующая груз вниз (бремсберговая); *1* – статическая тяговая характеристика привода; *2* и *3* – статическая силовая характеристика конвейера при холостом ходе и номинальной загрузженности; *4* и *G*, *D* – точки равновесия тягового усилия привода и силы сопротивления движению конвейера при холостом ходе и номинальной загрузженности

Бремсберговые конвейеры, установленные при углах наклона больше значения угла нулевой мощности в зависимости от загруженности, работают в режимах: двигательном; самоходном; тормозном. При этом точку  $4$  равновесия сил при холостом ходе всегда располагают в первом квадранте, а точку  $G$  равновесия тормозного усилия привода  $F_{о.н}^T$  и статического сопротивления движению конвейера  $W_{ст.н}^{ДВ}$  при номинальной загруженности – во втором. В точках  $4$  и  $G$  равновесия сил скорости ленты соответственно равны  $V_H$  и  $V_H^T$ . Точка  $a_p$  у таких конвейеров может располагаться в интервале от точки  $4$  до точки  $G$ , следовательно, и на оси ординат в точке  $V_c$ . При этом будет иметь место загруженность синхронная, т. е. соответствующая синхронной скорости движения ленты  $V_c$ . За счёт действия неуравновешенной составляющей веса груза на ленте преодолеваются как силы сопротивления движению ленты, так и силы сопротивления привода. При этом имеет место работа конвейера в самоходном режиме, а двигателя привода – в режиме идеального холостого хода. При загруженности более синхронной двигатель работает в генераторном режиме, создавая тормозной момент. При отключении с него напряжения тормозной момент исчезает и конвейер под действием неуравновешенной составляющей веса груза на ленте разгоняется. При определённых условиях при свободном выбеге конвейера за одну секунду скорость движения ленты может удваиваться [27]. Разгоны приводят к повреждению двигателя. При увеличении за время разгона скорости конвейера на 25, 50 и 100 % (вдвое) кинетическая энергия, количество теплоты и длина тормозного пути увеличиваются соответственно в 1,6, 2,25 и 4,0 раза [33]. При этом время торможения увеличивается соответственно в 1,25, 1,5 и 2,0 раза. Время холостого хода тормоза должно быть минимально возможным. В соответствии с рекомендациями [27] время, отсчитываемое от начала уменьшения тормозного момента двигателя до начала нарастания тормозного момента тормоза, должно составлять не более 0,1 с.

Рассматривая разгрузку и загрузку конвейера как переходные режимы, при моделировании используем уравнение движения конвейера в форме записи с явно выраженной приведённой массой конвейера. При этом удобно изменяющуюся во времени поступа-

тельно движущуюся массу связывать с длиной загруженной части конвейера в функции времени.

### 1.5. Уравнение движения

При расчёте времени пуска и торможения конвейера (при условии отсутствия пробуксовки ленты на барабане) рассматривают всю движущуюся систему конвейерной установки как жёсткую. Массу всех движущихся частей конвейерной установки считают приведённой к ободу приводного барабана [3, 22]. При этом скорость движения ленты равна линейной скорости обода барабана, характер изменения её скорости определяется законом изменения скорости барабана. Уравнение движения приведённой к ободу приводного барабана массы всех движущихся частей конвейерной установки по физическому смыслу описывает поступательное движение груза вместе с лентой непосредственно конвейера. В дальнейшем для краткости будем писать уравнение движения конвейера вместо уравнения движения приведённой к ободу приводного барабана массы всех движущихся частей конвейерной установки.

Уравнение движения конвейера, как любой другой транспортной машины для двигательного режима работы, записываем в виде

$$F_0 = W_{\text{ст}} + M_{\text{пр}}^{\text{к}} \frac{dv}{dt}, \quad (1.26)$$

где  $M_{\text{пр}}^{\text{к}}$  – приведённая к ободу приводного барабана масса поступательно движущихся и вращающихся частей конвейера, кг;  $v$  – скорость движения ленты с грузом, м/с;  $dv/dt$  – ускорение (замедление) конвейера,  $\text{мс}^{-2}$ .

При работе ленточного конвейера в переходных режимах, в общем случае, тяговое (тормозное) усилие привода  $F_0(-F_0)$ , развиваемое двигателем, уравновешивается статической силой сопротивления движению  $-W_{\text{ст}}$  (движущей силой  $+W_{\text{ст}}$ ) и инерционной силой  $M_{\text{пр}}^{\text{к}} dv/dt$  (Н), возникающей при изменении скорости поступательно движущихся и вращающихся частей конвейера.



В соответствии с изложенным уравнение движения ленточно-го конвейера может быть записано в виде уравнения равновесия сил следующим образом:

для двигательного и тормозного режимов работы

$$\pm F_0 \pm W_{\text{ст}} = M_{\text{пр}}^{\text{к}} \frac{dv}{dt}; \quad (1.27)$$

для режима свободного выбега

$$\pm W_{\text{ст}} = M_{\text{пр}}^{\text{к}} \frac{dv}{dt}; \quad (1.28)$$

для выбега с приложением тормозного усилия

$$-W_{\text{т}} \pm W_{\text{ст}} = M_{\text{пр}}^{\text{к}} \frac{dv}{dt}, \quad (1.29)$$

где  $W_{\text{т}}$  – приведённое к ободу приводного барабана тормозное усилие тормоза (тормозная сила), Н.

Знаки перед силами в уравнениях (1.27), (1.28), (1.29) принимаются по правилу, изложенному в п. 1.2 для моментов.

Массу поступательно движущихся и вращающихся частей конвейера, приведённую к ободу приводного (ведущего) барабана, определяем по формуле

$$M_{\text{пр}}^{\text{к}} = (L - R)q_{\text{г}} + L(2q_{\text{л}} + \dot{q}_{\text{р}} + q_{\text{р}}'') + m_{\text{пр}}, \quad (1.30)$$

в которой

$$m_{\text{пр}} = \frac{C_{\text{пр}} \left( GD_{\text{и}}^2 \right)_{\text{р}}}{4 g R_{\text{б}}^2} i^2, \quad (1.31)$$

где  $(L - R)q_{\text{г}}$  – масса груза (кг) на конвейере длиной  $L$  (м) при длине незагруженного участка  $R$  (м) ленты;  $m_{\text{пр}}$  – приведённая к ободу барабана масса привода, кг;  $(GD_{\text{и}}^2)_{\text{р}}$  – маховый момент ротора двигателя ( $\text{Н} \cdot \text{м}^2$ ) привода, принимаемый из характеристики

двигателя;  $R_{\sigma}$  – радиус приводного барабана, м;  $i$  – передаточное число редуктора;  $C_{\text{пр}} = 1,3 \div 1,4$  – коэффициент, учитывающий приведённую массу вращающихся частей редуктора, барабана, соединительных муфт [34].

Для привода, оснащённого редуктором, двигателем и предохранительной гидромуфтой [34]:

$$m_{\text{пр}} = \frac{\left[ C_{\text{пр}} \left( GD_{\text{и}}^2 \right)_{\text{р}} + \left( GD_{\text{и}}^2 \right)_{\text{ГМ}} \right]}{4 g R_{\sigma}^2} i^2, \quad (1.32)$$

где  $(GD_{\text{и}}^2)_{\text{ГМ}}$  – маховый момент гидромуфты ( $\text{Н} \cdot \text{м}^2$ ), принимаемый из технической характеристики гидромуфты.

При оснащении привода редуктором, двигателем и пуско-предохранительной гидромуфтой [34]

$$m_{\text{пр}} = \frac{\left[ C_{\text{пр}} \left( GD_{\text{и}}^2 \right)_{\text{р}} + \left( GD_{\text{и}}^2 \right)_{\text{ТК}} \right]}{4 g R_{\sigma}^2} i^2, \quad (1.33)$$

где  $(GD_{\text{и}}^2)_{\text{ТК}}$  – маховый момент турбинного колеса гидромуфты, ( $\text{Н} \cdot \text{м}^2$ ), принимаемый из характеристики гидромуфты.

В формулах (1.27), (1.28), (1.29) статическую силу сопротивления движению  $W_{\text{ст}}$  определяют как алгебраическую сумму всех сил сопротивления

$$W_{\text{ст}} \approx \sum W \approx W_{\text{вг}} + W_{\text{н}} + \sum W_{\text{нб}} + W_{\text{пр}}, \quad (1.34)$$

где  $W_{\text{вг}}$  и  $W_{\text{н}}$  – сила сопротивления движению ветвей ленты (Н) соответственно верхней (с грузом) и нижней;  $\sum W_{\text{нб}}$  – суммарная сила сопротивления движению ленты на направляющих (отклоняющих) барабанах, обусловленная жёсткостью ленты в точке набегания на барабан и точке сбегания с барабана и сопротивлениями в подшипниках оси барабана, Н;  $W_{\text{пр}}$  – сила сопротивления движению ленты на приводном барабане (барабанах), которая обусловлена жёсткостью

ленты, потерями в подшипниках и силами трения вследствие упругого проскальзывания ленты по барабану на дуге скольжения.

Приближённо  $W_{\text{пр}}$  определяют по формуле

$$W_{\text{пр}} = \xi(S_{\text{нб}} + S_{\text{сб}}), \quad (1.35)$$

где  $\xi = 0,04 \div 0,05$  – коэффициент сопротивления на приводном барабане [17];  $S_{\text{нб}}$  и  $S_{\text{сб}}$  – соответственно натяжения ленты в точках набегания на барабан и сбегания с него.

Сопротивление на отклоняющем (направляющем) барабане пропорционально натяжению ленты в точке набегания  $S'$  на барабан и зависит от угла обхвата лентой барабана. Значение суммарной силы сопротивления  $\sum W_{\text{нб}}$  определяем по формуле

$$\sum W_{\text{нб}} = n_{\text{б}} \xi_1 S', \quad (1.36)$$

где  $\xi_1 = 0,01 \div 0,04$  – коэффициент сопротивления на отклоняющем барабане [35];  $n_{\text{б}}$  – количество барабанов.

Для прямолинейных конвейеров сопротивления движению ленты определяют в соответствии с ОСТ 12.14.130 – 79 [34] по формулам:

загруженной верхней ветви

$$W_{\text{вг}} = Lg(q_{\text{г}} + q_{\text{л}} + q_{\text{р}}')\varpi_{\text{э}} \cos\beta + Lg(q_{\text{г}} + q_{\text{л}}) \sin\beta; \quad (1.37)$$

незагруженной верхней ветви

$$W_{\text{вн}} = Lg(q_{\text{л}} + q_{\text{р}}')\varpi_{\text{э}} \cos\beta + Lgq_{\text{л}} \sin\beta; \quad (1.38)$$

для нижней ветви

$$W_{\text{н}} = Lg(q_{\text{л}} + q_{\text{р}}'')\varpi_{\text{э}} \cos\beta + Lgq_{\text{л}} \sin\beta. \quad (1.39)$$

В формулах (1.37), (1.38), (1.39) приняты следующие обозначения:  $L$  – длина конвейера, м;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{мс}^{-2}$ ;  $q_{\text{л}}$  – масса одного метра длины ленты, кг/м;  $q_{\text{р}}'$  и  $q_{\text{р}}''$  – масса вращающихся частей роlikоопор, приведённая к одному метру длины ленты соответственно верхней и нижней ветвей, кг/м;  $\varpi_{\text{э}}$  – коэффициент сопротивления движению ленты, эквивалентный;  $\beta$  – угол

наклона конвейера, град;  $q_{\Gamma}$  – масса груза (расчётная), приходящаяся на 1 м длины ленты конвейера, кг/м. Значение  $q_{\Gamma}$  определяем по формуле

$$q_{\Gamma} = \frac{Q_{\text{расч}}}{3,6 V}, \quad (1.40)$$

где  $Q_{\text{расч}}$  – производительность конвейера (расчётная), т/ч;  $V$  – скорость движения ленты, м/с. Значение  $q_{\Gamma.\text{ном}}$  определяется по (1.40) при условии  $Q_{\text{расч}} = Q_{\text{макс}}$ .

При расчёте по формулам (1.37), (1.38), (1.39) в функциях  $\cos\beta$  и  $\sin\beta$  перед углом  $\beta$  ставится знак «+» при движении ветви вверх и знак «-» при движении ветви вниз.

При работе конвейерной установки с установившейся скоростью движения ленты сила инерции равна нулю. При этом из уравнения (1.27) для горизонтальной, уклонной и бремсберговой установок, работающих в двигательном режиме, получаем

$$F_0 - W_{\text{ст}} = 0; \quad F_0 = W_{\text{ст}}, \quad (1.41)$$

а для установок, транспортирующих груз вниз, работающих в тормозном режиме:

$$-F_0^{\text{T}} + W_{\text{ст}} = 0; \quad F_0^{\text{T}} = W_{\text{ст}}. \quad (1.42)$$

В уравнении (1.41) тяговое усилие  $F_0$ , развиваемое приводом, уравновешивается статической силой сопротивления движению ленты  $W_{\text{ст}}$ , направленной в противоположную сторону скорости движения.

В уравнении (1.42) сила  $W_{\text{ст}}$  является движущим усилием, которое создаётся неуравновешенной составляющей веса груза на ленте и направлено в сторону скорости движения ленты при работе конвейера в тормозном режиме. Механическая энергия, создаваемая неуравновешенной составляющей веса груза на ленте, подводится к валу двигателя. Двигатель вращается с угловой скоростью выше синхронной и работает в режиме рекуперативного торможения (в генераторном режиме параллельно с сетью). При этом создаваемое двигателем тормозное усилие  $-F_0^{\text{T}}$  направлено в противо-

положительную сторону скорости движения ленты и уравновешивает движущее усилие  $W_{\text{СТ}}$  конвейера.

Положительное значение  $W_{\text{СТ}}$  свидетельствует о том, что сила действия неуравновешенной составляющей веса груза на ленте превосходит суммарное значение сил сопротивления движению ленты, обусловленных силами трения, и направлена в сторону скорости движения ленты конвейера.

Мощность на валу двигателя  $N$  (кВт) определяется по статическому тяговому усилию привода  $F_o = W_{\text{СТ}}$ :

при двигательном режиме

$$N = \frac{F_o V}{1000 \eta}; \quad (1.43)$$

при тормозном режиме

$$N = \frac{|F_o^T| V}{1000} \eta. \quad (1.44)$$

Установочная (расчётная) мощность двигателя

$$N_{\text{уст}} = k_M N. \quad (1.45)$$

В формулах (1.43), (1.44), (1.45) приняты следующие обозначения:  $\eta$  – КПД привода, учитывающий потери в трансмиссии от вала приводного барабана до вала двигателя;  $k_M$  – коэффициент запаса мощности; значения  $\eta$ ,  $k_M$  следует принимать по рекомендациям работ [13, 26, 34 и др.];  $V$  – скорость движения ленты, определяется по формуле

$$V = V_c (1 \pm S_{\text{НОМ}}). \quad (1.46)$$

При транспортировании груза вниз необходимо определять мощность холостого хода конвейерной установки, которая может оказаться больше мощности при номинальной загрузке конвейера.

При таких переходных режимах, как пуск и торможение ленточного конвейера, описываемых уравнениями (1.27), (1.29), в кон-

вейерной ленте помимо статических усилий возникают дополнительные динамические усилия, связанные с изменением скорости ленты.

Динамические усилия, алгебраически суммируясь со статическими усилиями, вызывают перераспределение натяжения на приводе и могут привести к его неустойчивой работе, например частичной или полной пробуксовке. Возникновение пробуксовки ленты на барабане приводит к интенсивному износу нижней обкладки ленты и футеровке барабана, нагреву барабана, резкому падению коэффициента сцепления ленты с барабаном, что затрудняет осуществление переходного режима [3].

## **1.6. Влияние динамических составляющих натяжения ленты на сцепление её с приводным барабаном**

### **1.6.1. Особенности режима пуска**

Значительные динамические натяжения возникают при пуске конвейера, если в процессе разгона двигатель развивает большой избыточный момент, т. е. момент, затрачиваемый только на преодоление инерции системы. Особенно резкие пуски могут привести к порыву ленты в опасном сечении (например, в месте стыка). В практике эксплуатации установленных на конвейерных штреках лав конвейеров, оснащённых резинотканевой лентой шириной 800 мм и двигателями с короткозамкнутым ротором, замечено, что при пуске незагруженных (частично загруженных) конвейеров с жёстким натяжным устройством рвётся лента, как правило, на верхней ветви вблизи концевого барабана (или на нём). Объяснить это явление можно следующим образом. Распространяющиеся от приводного барабана в ленте упругие волны деформации встречаются на верхней ветви. При этом движущаяся от привода вдоль верхней ветви волна растяжения увеличивает в ней натяжение. Распространяющаяся же по нижней ветви волна сжатия преломляется на концевом барабане (на границе плотностей ветвей ленты) и движется вдоль верхней ветви к приводному барабану, уменьшая в ней натяжение. В момент времени встречи волн растяжения и сжатия возникает силовой «рывок ленты», воздействующий на отрезок ленты между местом встречи волн и концевым барабаном, вовлекаемый в движение.

При включении конвейера на ленту воздействует от привода силовой импульс, под действием которого в ветвях ленты возникают упругие волны деформации. Фронт волн движется от привода вдоль ленты конвейера. При этом удалённые от привода сечения ленты вовлекаются в движение по мере того, как фронт упругой волны достигнет этих сечений. На рис. 1.3 изображены схемы к пояснению перераспределения натяжения ленты на приводном барабане при пуске конвейера. На схеме приняты следующие обозначения:  $C_1, C_2$  – скорости распространения волн упругой деформации (м/с) вдоль ленты соответственно верхней и нижней ветвей, при условии, что в ленте предварительно создано статическое натяжение;  $S_{\text{нб.ст}}$  и  $S_{\text{сб.ст}}$  – усилия в набегающей и сбегающей ветвях ленты в установившемся режиме (перед разгоном ленты) у приводного барабана, Н;  $S_{\text{нб.д}}(t)$  и  $S_{\text{сб.д}}(t)$  – динамические составляющие натяжения  $t$  ленты в набегающей и сбегающей ветвях у приводного барабана, как функции времени.

Для обеспечения плавного пуска конвейера без пробуксовки и устранения возможности порыва ленты разработаны различные системы привода. Расчёт режима пуска включает определение динамических составляющих натяжения ленты и времени пуска.

На основании расчётов выбирают схему управления пуском, тип и характеристику привода, тип и характеристику натяжного устройства (НУ), места установки привода и натяжного устройства.

Для исключения пробуксовок ленты на приводном барабане (барабанах) во время пуска конвейера должно выполняться условие (закон трения гибких тел):

с податливым натяжным устройством

$$\frac{S_{\text{нб.ст}} + S_{\text{нб.д}}(t^*)}{S_{\text{сб.ст}}} \leq e^{\mu \alpha} \frac{1}{k_{\text{тс}}}; \quad (1.47)$$

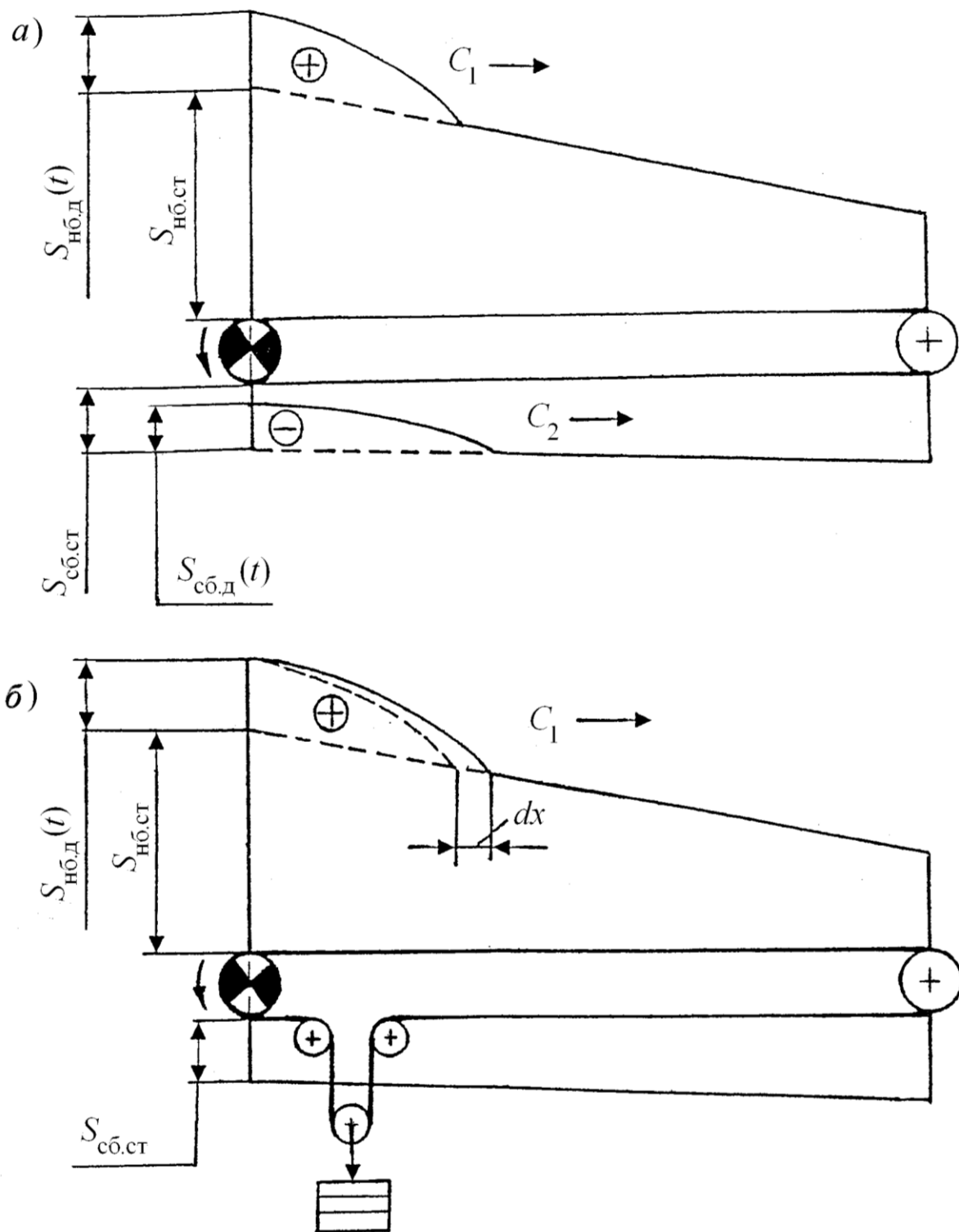


Рис. 1.3. Распространение волн деформации в ленте при пуске конвейера:  
 а – с жёстким натяжным устройством;  
 б – с податливым натяжным устройством



с абсолютно жёстким натяжным устройством

$$\frac{S_{\text{нб.ст}} + S_{\text{нб.д}}(t^*)}{S_{\text{сб.ст}} - |S_{\text{сб.д}}(t^*)|} \leq e^{\mu\alpha} \frac{1}{k_{\text{тс}}}, \quad (1.48)$$

где  $e^{\mu\alpha}$  – тяговый фактор привода;  $k_{\text{тс}}$  – коэффициент запаса сил трения на приводном барабане;  $t^*$  – значение текущего времени  $t$  (с) с начала разгона конвейера, при котором соотношение значений натяжения ленты в ветвях на приводе является наиболее опасным с точки зрения возникновения пробуксовки барабана.

### 1.6.2. Особенности режима торможения

При торможении конвейера в ленте возникают динамические усилия, связанные с остановкой движущихся частей конвейера. Более отдалённые от привода участки ленты в начальный период торможения движутся с большей скоростью, чем расположенные у привода, т. е. «набегают» на них. В процессе торможения снижается натяжение ленты на верхней грузёной ветви, в результате которого может возникать пробуксовка (проскальзывание) ленты относительно приводного барабана (скорость ленты больше скорости обода барабана), или потеря лентой продольной устойчивости движения – образуются складки ленты, недопустимые провесы её между роlikоопорами – «мешки», способствующие возникновению просыпания груза с ленты (рис. 1.4, 1.5, 1.6) [19, 36].

Во время последующего пуска конвейера лента и стыки ленты испытывают опасные напряжения и груз разбрасывается по сторонам. Динамические усилия следует учитывать при определении значения тормозного усилия, при котором исключается проскальзывание ленты на приводе при экстренном торможении, а также при определении значения натяжения ленты в грузовой ветви, при котором исключается потеря лентой продольной устойчивости движения, т. е. натяжение ленты не падает меньше величины  $S_{\text{г.мин}}$  (Н) [3]:

$$S_{\text{г.мин}} = (5 \div 8)(q_{\text{г}} + q_{\text{л}})l_{\text{п}}'. \quad (1.49)$$

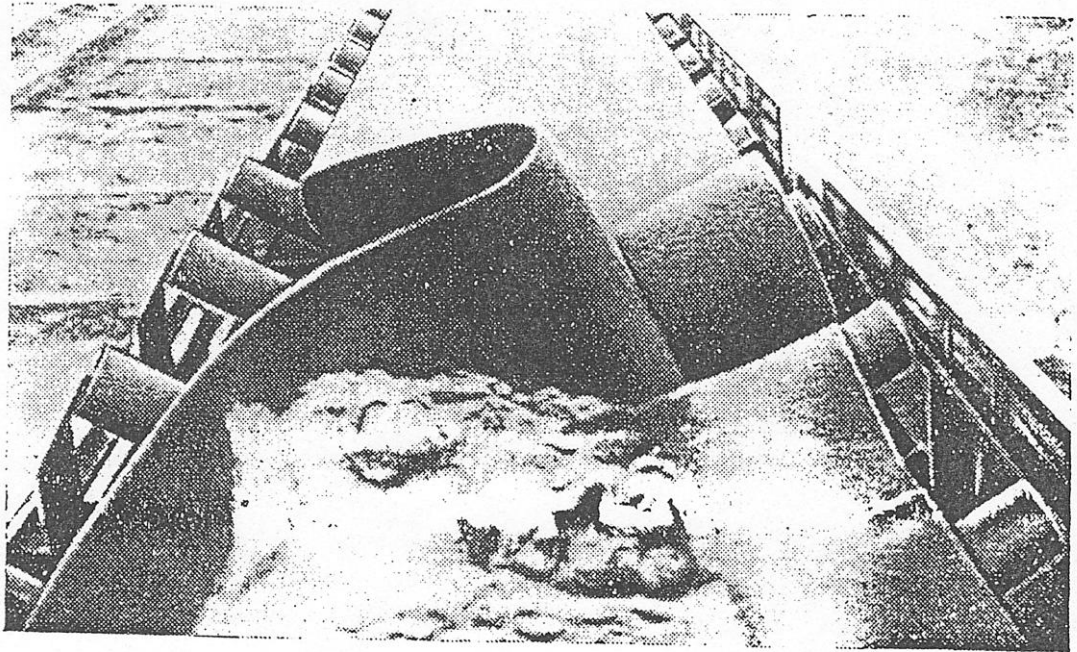


Рис. 1.4. Потеря устойчивости ленты и образование складки при торможении ленточного конвейера большой длины

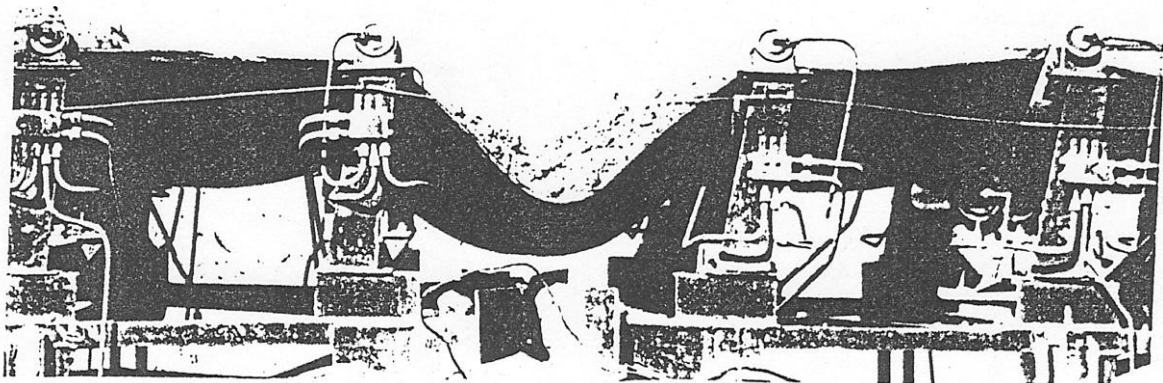


Рис. 1.5. Образование «мешков» на верхней ветви конвейера с грузовым натяжным устройством на сбегавшей ветви головного привода

Для исключения проскальзывания ленты на приводном барабане (барабанах) во время процесса торможения конвейера должно выполняться условие (закон трения гибких тел):

с податливым натяжным устройством

$$\frac{S_{\text{сб.ст}}}{S_{\text{нб.ст}} - |S_{\text{нб.д}}(t^*)|} \leq \frac{e^{\mu\alpha}}{k_{\text{ТС}}}; \quad (1.50)$$

с абсолютно жёстким натяжным устройством

$$\frac{S_{\text{сб.ст}} + S_{\text{сб.д}}(t^*)}{S_{\text{нб.ст}} - |S_{\text{нб.д}}(t^*)|} \leq \frac{e^{\mu\alpha}}{k_{\text{ТС}}}. \quad (1.51)$$

На рис. 1.6 приняты те же обозначения, что и на рис. 1.3, только применительно для торможения. В формулах же для определения скоростей  $C_1$  и  $C_2$  распространения волн упругой деформации используется значение продольной динамической жёсткости ленты  $E_{\text{О.д}}$ , Н;  $\rho_{\text{В}}$  – плотность верхней ветви ленты, кг/м;  $\rho_{\text{Н}}$  – плотность нижней ветви ленты, кг/м.

Значение динамической жёсткости резиновых тросов определяют по формуле [22]

$$E_{\text{О.д}} = k_{\text{Т}} F_{\text{Т}} E_{\text{Т}},$$

где  $k_{\text{Т}}$  – коэффициент, учитывающий неравномерную вытяжку тросов ( $k_{\text{Т}} = 0,7 \div 0,8$ );  $F_{\text{Т}}$  – суммарная площадь сечения тросов,  $\text{см}^2$ ;  $E_{\text{Т}}$  – динамический модуль упругости троса,  $\text{Н/см}^2$ , значение  $E_{\text{Т}} = 0,8 \cdot 10^7 \text{ Н/см}^2$ .

В работе [13] приведены следующие значения жёсткости лент: динамическая жёсткость резиновых тросов  $E_{\text{О.д}} = 1,1 E$ , где  $E$  – статическая жёсткость ленты; динамическая жёсткость тканевой ленты  $E_{\text{О.д}} = (2 - 3) E$ .

При расчёте режимов пуска и торможения следует пользоваться рекомендациями работ [3, 16, 22, 37, 38].

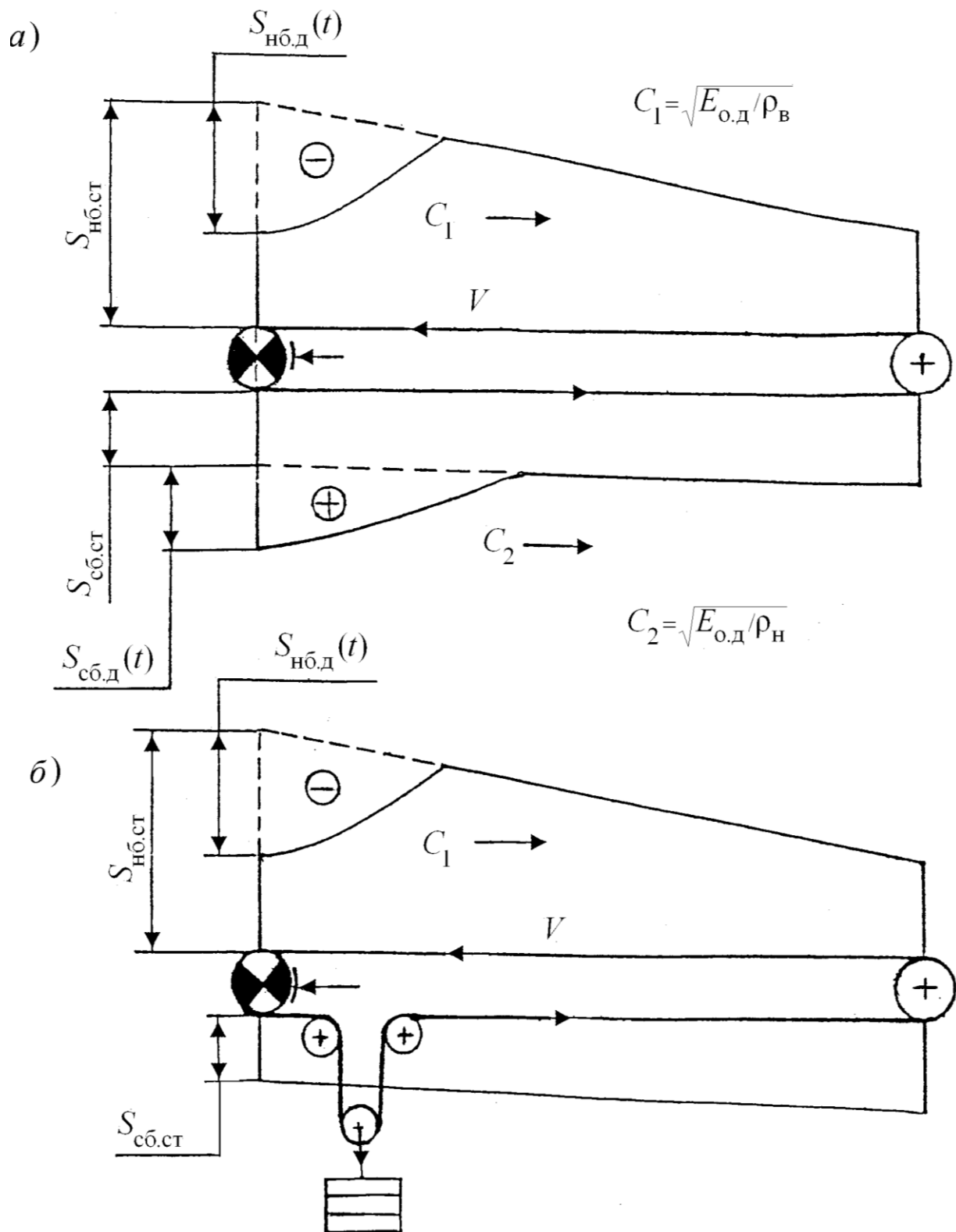


Рис. 1.6. Распространение волн деформации в ленте при торможении конвейера:  
 а – с жёстким натяжным устройством;  
 б – с податливым натяжным устройством

## **Выводы**

На основании рассмотренных аварийных ситуаций работы ленточных конвейерных установок в условиях эксплуатации и их анализа сделаны следующие выводы.

1. Во время работы бремсберговых конвейеров, установленных при угле наклона, близком к предельному углу наклона, при увеличении загруженности конвейера может возникать аварийная ситуация, при которой в одном случае скорость ленты опережает окружную скорость барабана, а в другом – конвейер начинает разгоняться.

2. На уклонных конвейерных установках, имеющих двухбарабанный привод с независимой связью между барабанами и оснащённых асинхронными короткозамкнутыми двигателями с гидромуфтами, при пуске двигателей пускателями без визуального контроля потребляемой мощности, может возникать аварийная ситуация, при которой один из двигателей работает в двигательном режиме, а другой – в генераторном. При этом практически невозможно определить истинное текущее распределение нагрузки между барабанами без инструментального замера.

3. Первой из основных причин возникновения пожаров на ленточных конвейерах является нагрев ленты на приводном барабане из-за проскальзывания (пробуксовки) ленты на приводном барабане вследствие недостаточного натяжения ленты.

В связи с этим вторая глава посвящается изложению материала по определению контрольного значения натяжения ленты, учитывающего упругое продольное удлинение ленты, тип ленты и форму её провеса между роlikоопорами на базе компьютеризации вычислительного процесса.

## **Вопросы для проверки**

1. К чему приводит недостаточное натяжение ленты на конвейере?
2. Чему способствует излишнее натяжение ленты на конвейере?
3. В какие периоды времени возникают динамические составляющие натяжения ленты в ветвях?
4. Допустимый угол наклона бремсбергового конвейера.

5. Допустимый угол наклона уклонного конвейера.
6. Поясните разницу в значениях относительного удлинения резинокросовой и тканевой лент. Приведите, примерно, кратность значений относительного удлинения указанных лент.
7. Режимы работы горизонтальных и уклонных конвейеров.
8. Режимы работы бремсберговых конвейеров при углах наклона меньших угла нулевой мощности.
9. Режимы работы бремсберговых конвейеров при углах наклона больших угла нулевой мощности.
10. Режимы работы бремсберговых конвейеров при угле наклона равном углу нулевой мощности.
11. Назначение натяжного устройства (НУ) на конвейере. Типы НУ и возможные места их установки на конвейере.
12. Наиболее дорогой и наименее долговечный элемент ленточного конвейера. Примерная стоимость этого элемента от стоимости конвейерной установки.
13. К чему могут привести пробуксовки ленты на приводных барабанах? Причины, способствующие возникновению пробуксовок.
14. Причины, при которых на уклонном конвейере, имеющем двухбарабанный привод с самостоятельными двигателями, создаётся ситуация, когда один из двигателей работает в генераторном режиме, а второй – в двигательном.
15. Математическая запись (функциональная зависимость) механических характеристик двигателя привода конвейера и непосредственно конвейера.
16. Математическая запись (функциональная зависимость) тяговых характеристик конвейерной установки (двигателя привода конвейера и непосредственно конвейера).
17. Объясните случайный характер горных грузопотоков.
18. Поясните понятия: свободный выбег конвейера; нормативное торможение конвейера; экстренное торможение конвейера.
19. При какой скорости накладываются тормоза при нормативном торможении конвейера?
20. В каких случаях происходит экстренное (аварийное) торможение конвейера?
21. Поясните, почему нельзя остановить за несколько секунд длинный ленточный конвейер.

22. Какие режимы работы ленточного конвейера относятся к переходным?

23. Углы наклона бремсбергового конвейера, при которых во время свободного выбега он саморазгоняется. За счёт каких сил происходит саморазгон конвейера?

24. Математическая запись (функциональная зависимость) скорости ленты конвейерной установки от скольжения двигателя.

25. В каком случае скорость ленты больше линейной скорости обода барабана на бремсберговом конвейере?

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ НАТЯЖЕНИЯ ЛЕНТЫ ПРИ РАЗГРУЗКЕ И ЗАГРУЗКЕ КОНВЕЙЕРА

Целью моделирования процессов разгрузки и загрузки конвейера является определение натяжения ленты  $S_{1XX}$  в точке сбегания ленты с приводного барабана при холостом ходе. По значению  $S_{1XX}$  определяется контрольное натяжение ленты в месте установки натяжного устройства. При моделировании для вычисления определённых интегралов применяется метод Симпсона с автоматическим выбором шага. При решении алгебраических уравнений для уточнения корня уравнения при моделировании процессов изменения натяжения ленты при разгрузке и загрузке конвейера используется численный метод половинного деления. Для подтверждения достоверности полученного значения натяжения ленты  $S_{1XX}$  применяется независимая программа. В качестве независимой программы используется решение полинома четвёртой степени, описывающего работу конвейера в режиме холостого хода. Для нахождения всех корней полинома использована подпрограмма «ZPLRC», которая находится в библиотеке *IMSL* профессиональной версии *FPS*.

Процесс изменения натяжения ленты в замкнутом контуре конвейера во время переходного режима зависит в той или другой степени от следующих его условий: типа применяемой ленты (резинотканевая, резинокросовая); угла наклона конвейера; расположения привода (в головной части или хвостовой или и в головной, и хвостовой частях); типа применяемого натяжного устройства (жёсткое, автоматическое) и места его расположения (в непосредственной близости от привода в головной части, в хвостовой части). С учётом конкретных условий возникает необходимость выполнения соответствующих вариантов расчёта, отличающихся, как правило, большой трудоёмкостью. В ряде случаев требуется решить нелинейные уравнения пятой степени, выраженные громоздкими формулами, совершенно неприемлемыми для практического применения. Моделирование на персональном компьютере переходных режимов с использованием численных методов решения нелинейных алгебраических уравнений является решением этой сложной задачи.



## 2.1. Жёсткость ленты

На процесс изменения натяжения ленты во время переходного режима влияет материал ленты. Наиболее важной характеристикой материала ленты в упругой области является отношение между напряжением в ленте  $\sigma$  и относительным её удлинением  $\varepsilon$ , при  $\varepsilon = 1$ . Оно называется модулем упругости материала ленты  $E_0$ , характеризует меру сопротивляемости деформированию и определяется по формуле

$$E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (2.1)$$

Относительное удлинение (деформация) материала ленты определяют по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (2.2)$$

где  $\Delta l$  – абсолютное удлинение (м) отрезка ленты длиной  $l$ , м.

Для резинотканевых лент  $E_0$  – модуль упругости, отнесённый к единице ширины прокладки, Н/см. Для резинотросовых лент  $E'_0$  – модуль упругости, отнесённый к единице площади сечения проволок, Н/см<sup>2</sup>.

При рассмотрении вопроса распределения натяжений в замкнутом контуре ленты конвейера с жёстким натяжным устройством во время переходного режима сравниваем три варианта расчёта в зависимости от формы провеса ленты между роlikоопорами: без учёта провеса; с учётом провеса – провес в виде уравнения параболы; с уточнением провеса – провес в виде квадратичной параболы.

1. В первом варианте расчёта пренебрегают влиянием изменения стрел провеса ленты между роlikоопорами на распределение натяжений по контуру и рассматривают контур ленты как замкнутый в кольцо длинный упругий стержень с жёсткостью  $E$  (Н), определяемой по формуле [13]:

для резинотканевых лент

$$E = B i E_0; \quad (2.3)$$

для резинотросовых лент

$$E = F E'_0, \quad (2.4)$$

где  $B$  – ширина ленты, см;  $i$  – число прокладок в ленте;  $E_0$  – модуль упругости материала прокладки, Н/1 см ширины прокладки;  $F$  – площадь сечения всех проволок тросов ленты, см<sup>2</sup>;  $E_0'$  – модуль упругости материала проволок, Н/см<sup>2</sup>.

В дальнейшем этот вариант именуется как вариант без учёта провеса. На рис. 2.1, *a* в пролёте  $l$  между роlikоопорами показан отрезок ленты  $L$  без провеса, рассматриваемый как упругий стержень.

2. Во втором варианте расчёта учитывают выборку стрел провеса ленты между роlikоопорами при распределении натяжений по контуру ленты. Рассматривают смещение сечений ленты при изменении натяжения как сумму упругих продольных деформаций и перемещения вследствие выборки стрел провеса между роlikоопорами. При этом жёсткость ленты рассматривают как агрегатную (приведённую) жёсткость  $E_A$  [22], определяемую по формуле

$$E_A = \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{1}{E_{\text{нит}}}}, \quad (2.5)$$

где  $E$  – статическая жёсткость ленты (Н), определяемая по значению относительного удлинения при малой скорости приложения нагрузки;  $E_{\text{нит}}$  – условная (фиктивная) жёсткость ленты (Н) как нерастяжимой нити, свободно лежащей на роlikоопорах, определяемая по формуле

$$E_{\text{нит}} = \frac{12 S^3}{q_H^2 l_p^2}, \quad (2.6)$$

где  $S$  – натяжение ленты, Н;  $q_H$  – нагрузка, Н/м, действующая на ленту, распределённая равномерно по длине расстояния между роlikоопорами  $l_p$ , м.

Форма кривой провисания ленты между роlikоопорами рассматривается в виде уравнения параболы [23] (рис. 2.1, *a*, *б*)

$$y = \frac{q_H x^2}{2 S}, \quad (2.7)$$

с наибольшей стрелой провеса  $y = f_{\text{max}}$  при значении  $x = l_p / 2$ .

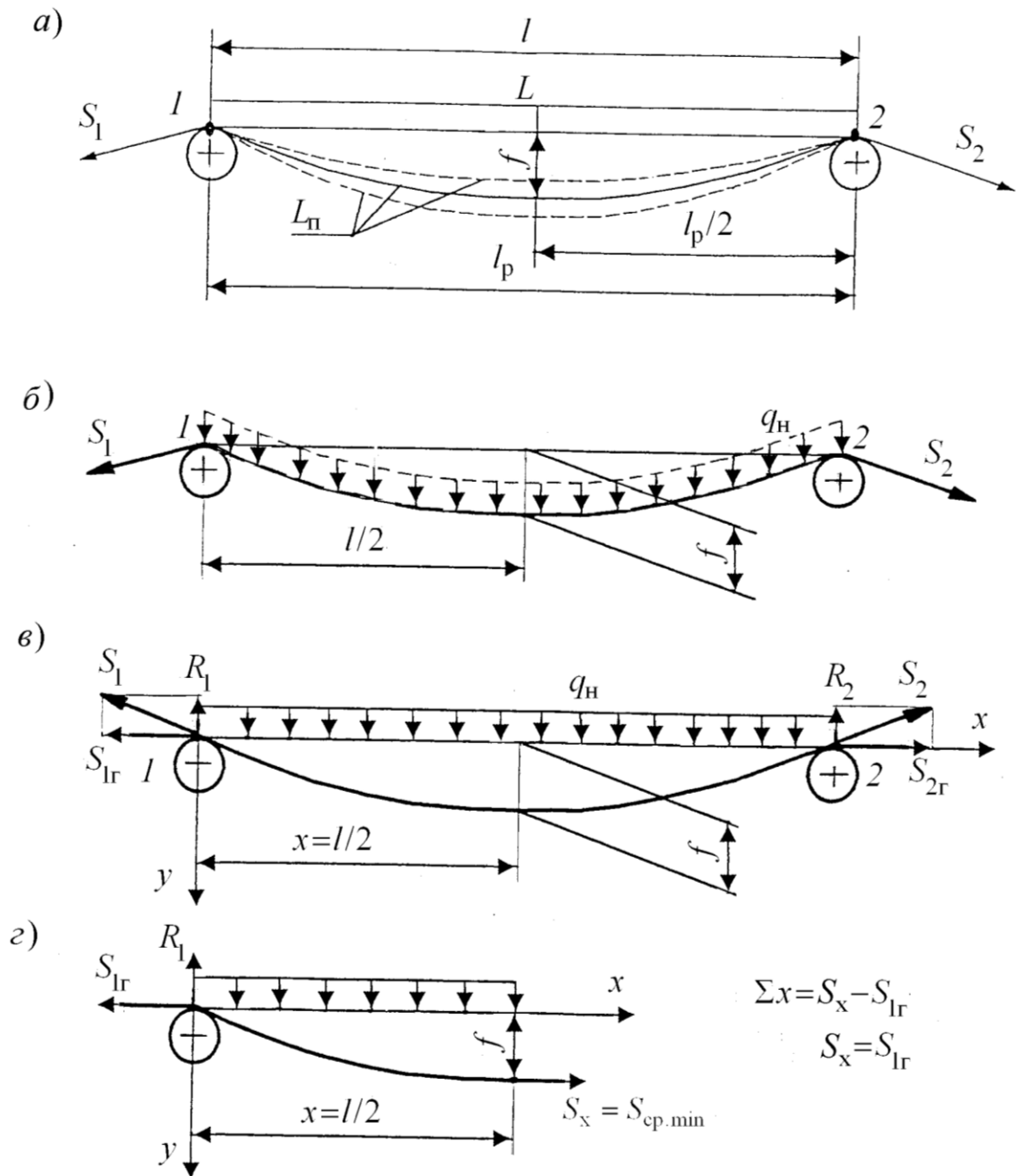


Рис. 2.1. Схема провисания ленты между роlikоопорами горизонтального конвейера:

а – при различной интенсивности нагрузки  $q_H$  на единицу длины ленты; б – при нагрузке, равномерно распределённой по длине провисающей ленты  $L_{\text{п}}$ ; в – при нагрузке, равномерно распределённой по длине пролёта  $l$ ; г – равновесие части ленты, отсечённой сечением  $x$ ;  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_x$  – натяжение ленты соответственно в точках перегиба ленты на роlikоопорах 1, 2 и посередине между ними;  $f$  – стрела провеса ленты

$$f_{\max} = \frac{q_{\text{H}} l_{\text{p}}^2}{8 S_{\min}}, \quad (2.8)$$

где  $f_{\max}$  – наибольшая стрела провеса (м) посередине между ролик-кооперами горизонтально установленного конвейера;  $q_{\text{H}} = g(q_{\text{Г}} + q_{\text{Л}})$  – для загруженной верхней ветви, Н/м;  $q_{\text{H}} = gq_{\text{Л}}$  – для нижней ветви, Н/м;  $l_{\text{p}} = l'_{\text{p}}$  – для верхней ветви, м;  $l_{\text{p}} = l''_{\text{p}}$  – для нижней ветви, м;  $S_{\min}$  – натяжение ленты в точке наибольшего её провисания между роликкооперами.

По нормам отраслевого стандарта [34] допустимая величина провеса ленты равна 1,5 % от расстояния между роликкооперами. При этом длина её по кривой провисания  $L_{\text{п}}$  мало отличается от расстояния между роликкооперами  $l_{\text{p}}$ . С учётом этого для упрощения расчётов с достаточной степенью точности считают, что нагрузка, действующая на ленту, равномерно распределена не по длине ленты, а по длине расстояния между роликкооперами (рис. 2.1, в). При указанной допустимой величине провеса ленты допустимое значение стрелы провеса (м) составляет

$$f_{\text{доп}} = 0,015 l'_{\text{p}}. \quad (2.9)$$

Из равенства (2.8), учитывая (2.9), определяют значение натяжения ленты  $S_{\min}$  в середине пролёта  $l$  между роликкооперами грузовой ветви (рис. 2.1, з):

$$S_{\text{ср. min}} = 8 g (q_{\text{Г}} + q_{\text{Л}}) l'_{\text{p}}. \quad (2.10)$$

В дальнейшем этот вариант именуется как вариант «с учётом провеса».

В работе [31] получено большое расхождение в значениях контрольного натяжения ленты, определённых по двум первым вариантам при применении резинотросовой ленты на конвейере. Значение контрольного натяжения ленты определяется из условия равенства упругого удлинения ленты при холостом ходе конвейера

и максимальной нагрузке. В соответствии с отраслевым стандартом [34] при жёстком натяжном устройстве значение контрольного натяжения ленты устанавливается на холостом ходу конвейера, которое обеспечивает расчётное значение натяжения, соответствующее максимальной нагрузке конвейера, гарантирующее работу без пробуксовки конвейера при различных режимах работы и провеса ленты в допустимых пределах.

Большое расхождение в значениях контрольного натяжения ленты, определённых по двум первым вариантам, послужило причиной сомнений в правомерности допущений, сделанных при выводе формулы (2.6), и необходимости рассмотрения третьего варианта, излагаемого ниже.

3. В третьем варианте учитывается уточнённое значение условной жёсткости ленты  $E_{\text{НИТ}}^*$  [39]. В этой работе резинотросовая лента, имеющая большую продольную и поперечную гибкость [3], рассматривается как гибкая нить, многократно изгибающаяся на роликкоопорах, на которую действует только осевое натяжение. При проведении расчётов использованы положения теории расчёта гибких нитей [40]. Полученная в этой работе формула (2.11) содержит угол наклона конвейера  $\beta$  и описывает форму кривой провисания ленты между роликкоопорами в виде квадратичной параболы (рис. 2.2):

$$y = \left( \frac{q l}{2 S} + \operatorname{tg} \beta \right) x - \frac{q x^2}{2 S}; \quad (2.11)$$

с ординатой провеса  $y$  при значении  $x = l/2$ :

$$\left. \begin{aligned} y &= \frac{q l^2}{8 S} + \frac{h}{2}, \\ y &= f + \frac{h}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

В формулах (2.11) и (2.12) приняты следующие обозначения:  $l$  – пролёт, т. е. длина горизонтальной проекции расстояния между роликкоопорами  $l_p$ , м;  $h$  – разность уровней между опорами 1 и 2, м;  $q$  – статическая эквивалентная нагрузка, распределённая вдоль длины пролёта  $l$ , определяемая из равенства

$$ql = \tilde{q}_H l_p, \quad (2.13)$$

где  $\tilde{q}_H$  – нагрузка (Н/м), действующая на ленту, лежащую на роликоопорах, равномерно распределённая не по длине ленты, а по длине расстояния между роликоопорами  $l_p$ . Для упрощения расчётов с достаточной степенью точности можно считать правомерным это допущение, так как длина по кривой провисания  $L_{\Pi}$  мало отличается от расстояния  $l_p$  (при допустимой стреле провеса в 1,5 % от расстояния между роликоопорами), принимаем  $\tilde{q}_H = q_H$ .

В формуле (2.12) натяжение ленты  $S$  и величина стрелы провеса  $f$  при значении  $x = \frac{l}{2}$  связаны зависимостью

$$f = \frac{ql^2}{8S}. \quad (2.14)$$

В формуле (2.14)  $S$  – горизонтальная составляющая растягивающего усилия ленты в любом поперечном сечении между роликоопорами 1 и 2, равная  $S_{\text{ср}} \cos\beta$ :

$$S_{\text{ср}} = \frac{2S_2 + g(q_{\Gamma} + q_{\Delta})h}{2}, \quad (2.15)$$

где  $S_{\text{ср}}$  – натяжение ленты в середине пролёта между роликоопорами 1 и 2, Н;  $S_2$  – натяжение ленты на роликоопоре 2, Н.

Значение уточнённой условной жёсткости ленты  $E_{\text{НИТ}}^*$  определяем по формуле [39]

$$E_{\text{НИТ}}^* = \frac{24S^3 / \cos\beta}{q_H^2 l_p^2 + 24S^2 \left( 1 + \frac{\text{tg}^2\beta}{2} - \frac{1}{\cos\beta} \right)}. \quad (2.16)$$

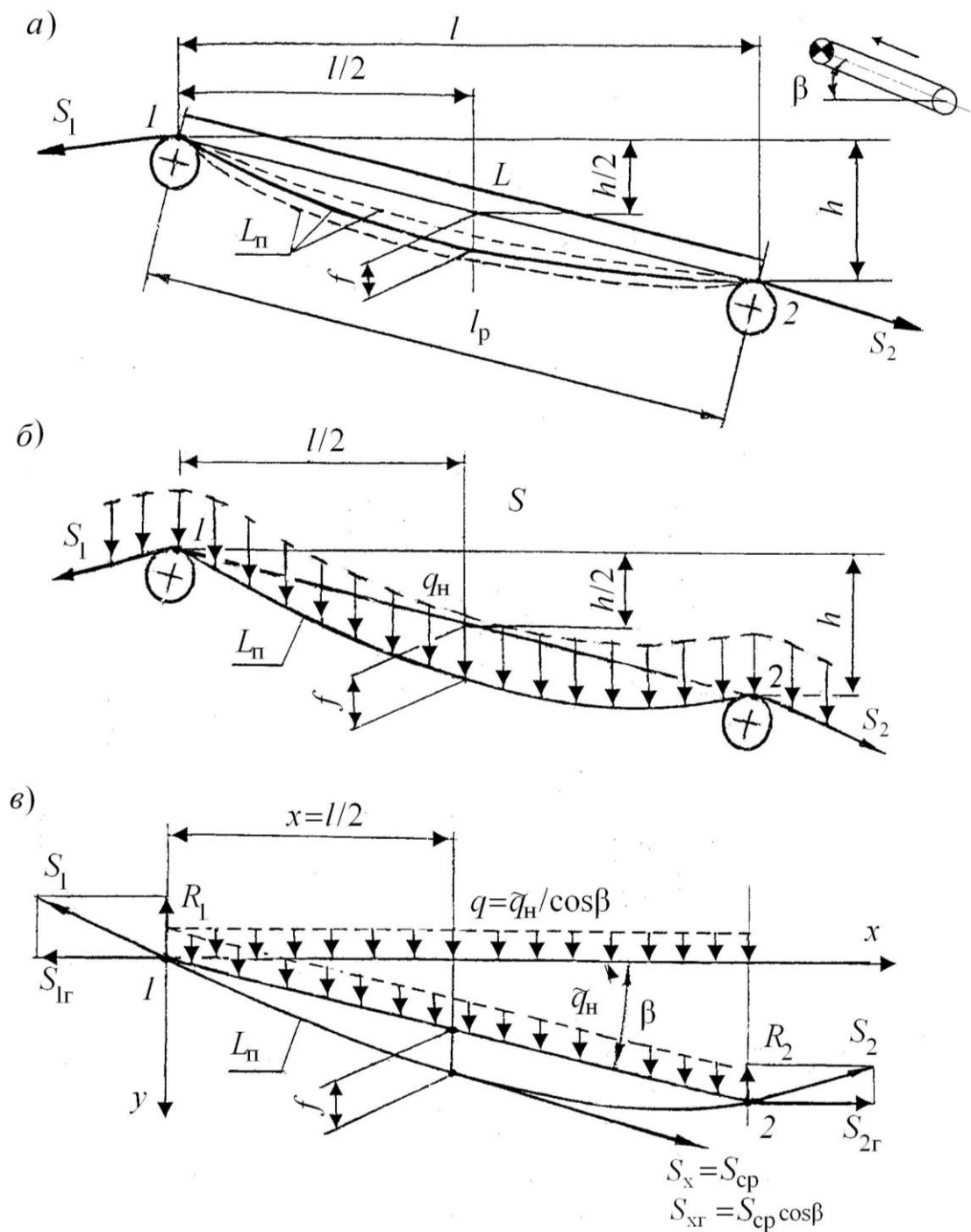


Рис. 2.2. Схема провисания ленты между роликоопорами уклонного конвейера:

*a* – при различной интенсивности нагрузки  $q_H$  на единицу длины ленты;  
*б* – при нагрузке, равномерно распределённой по длине провисающей ленты  $L_{\text{п}}$ ; *в* – при нагрузке, равномерно распределённой по длине расстояния  $l_p$  между роликоопорами и по длине пролёта  $l$ ;  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_x$  – натяжение ленты соответственно в точках перегиба ленты на роликоопорах 1, 2 и посередине между ними

Формулы (2.11), (2.12) при условии  $\beta = 0$ ,  $l = l_p$  и  $h = 0$  превращаются в формулы вида (2.7) и (2.8) для горизонтального конвейера.

Формула (2.16) при условии  $\beta = 0$  превращается в формулу

$$E_{\text{НИТ}}^* = \frac{24S^3}{q_{\text{Н}}^2 l_p^2} . \quad (2.17)$$

Значение  $E_{\text{НИТ}}^*$ , определяемое по формуле (2.17), в два раза больше, чем значение  $E_{\text{НИТ}}$ , определяемое по формуле (2.6).

В дальнейшем этот вариант именуется как вариант с «уточнением провеса».

Рассмотрение третьего варианта расчёта представляет интерес по следующим причинам. Во-первых, для выявления влияния сделанных допущений при выводе формулы (2.6) при определении фиктивной (условной) жёсткости ленты, приведённой в работах [22, 23, 41 и др.]. Во-вторых, с целью поиска наиболее обоснованного метода расчёта натяжения ленты и соответственно выдачи рекомендаций по выбору контрольного натяжения ленты для конвейеров, оснащённых резиноканальной лентой. Если для конвейеров, оснащённых резиноканальными лентами с небольшой жёсткостью (шириной 800 мм), выдаются рекомендации по контрольному натяжению ленты, то для конвейеров, оснащённых лентами повышенной жёсткости (резиноканальные ленты шириной 1000 мм и более, и резиноканальные), такие рекомендации отсутствуют [42]. В-третьих, необходимость иметь третий вариант расчёта, результаты определения значения контрольного натяжения ленты по которому подтвердили бы правомерность применения одного из двух рассмотренных выше вариантов расчёта: «без учёта провеса»; «с учётом провеса». Значения контрольного натяжения ленты, определённые по этим вариантам расчёта, отличаются на порядок.

Подставив значение  $E_{\text{НИТ}}$  из формулы (2.6) в (2.5), получим формулу для определения агрегатной жёсткости ленты, учитывающей как деформацию её, так и провес:

$$E_A = \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{q^2 l_p^2}{12S^3}} . \quad (2.18)$$



Подставив значение  $E_{\text{НИТ}}^*$  из формулы (2.16) в (2.5), получим формулу для определения агрегатной жёсткости ленты с учётом уточнения провеса между роlikоопорами:

$$E_A^* = \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{q^2 l_p^2 \cos \beta}{24 S^3} + \frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \beta / 2 - 1 / \cos) \cos \beta}{S}}. \quad (2.19)$$

Для удобства вычислений приняты следующие обозначения. Для формулы (2.18):

нижняя ветвь ленты

$$C_{\text{АН}} = \frac{g^2 q_{\text{Л}}^2 (l_p'')^2}{12}; \quad (2.20)$$

верхняя ветвь ленты загруженная

$$C_{\text{АВГ}} = \frac{g^2 (q_{\Gamma} + q_{\text{Л}})^2 (l_p')^2}{12}; \quad (2.21)$$

верхняя ветвь ленты незагруженная

$$C_{\text{АВН}} = \frac{g^2 q_{\text{Л}}^2 (l_p')^2}{12}. \quad (2.22)$$

Для формулы (2.19):

$$C_{\text{ВЕК}} = (1 + \operatorname{tg}^2 \beta / 2 - 1 / \cos \beta) \cos \beta; \quad (2.23)$$

нижняя ветвь ленты

$$C_{\text{РН}} = \frac{g^2 q_{\text{Л}}^2 (l_p'')^2 \cos \beta}{24}; \quad (2.24)$$

верхняя ветвь ленты загруженная

$$C_{\text{РВГ}} = \frac{g^2 (q_{\Gamma} + q_{\text{Л}})^2 (l_p')^2 \cos \beta}{24}; \quad (2.25)$$

верхняя ветвь ленты незагруженная

$$C_{\text{РВН}} = \frac{g^2 q_{\text{Л}}^2 \left( l'_{\text{Р}} \right)^2 \cos \beta}{24}. \quad (2.26)$$

В формулах (2.20)–(2.26) приняты следующие обозначения:  $C_{\text{АН}}$ ,  $C_{\text{АВГ}}$  и  $C_{\text{АВН}}$  – расчётное постоянное значение ( $\text{Н}^2$ ) в условной жёсткости ветви ленты, соответственно нижней, верхней загруженной и незагруженной;  $C_{\text{РН}}$ ,  $C_{\text{РВГ}}$  и  $C_{\text{РВН}}$  – постоянное значение ( $\text{Н}^2$ ) в уточнённой условной жёсткости ветви ленты, соответственно нижней, верхней загруженной и незагруженной;  $C_{\text{ВЕК}}$  – постоянное значение в уточнённой условной жёсткости ленты, обусловленное углом наклона конвейера.

Зависимость  $C_{\text{ВЕК}}$  от угла наклона конвейера представлена на рис. 2.3. Анализ зависимости показывает, что при угле наклона конвейера свыше  $8^\circ$  значение  $C_{\text{ВЕК}}$  резко возрастает.

С учётом формул (2.20), (2.21), (2.22) формула (2.18) для определения агрегатной жёсткости принимает следующий вид:

для нижней ветви

$$E_{\text{АН}} = \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{C_{\text{АН}}}{S_{\text{Н}}^3(x)}}; \quad (2.27)$$

для верхней загруженной ветви

$$E_{\text{АВГ}} = \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{C_{\text{АВГ}}}{S_{\text{ВГ}}^3(y)}}; \quad (2.28)$$

для верхней незагруженной ветви

$$E_{\text{АВН}} = \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{C_{\text{АВН}}}{S_{\text{ВН}}^3(y)}}. \quad (2.29)$$

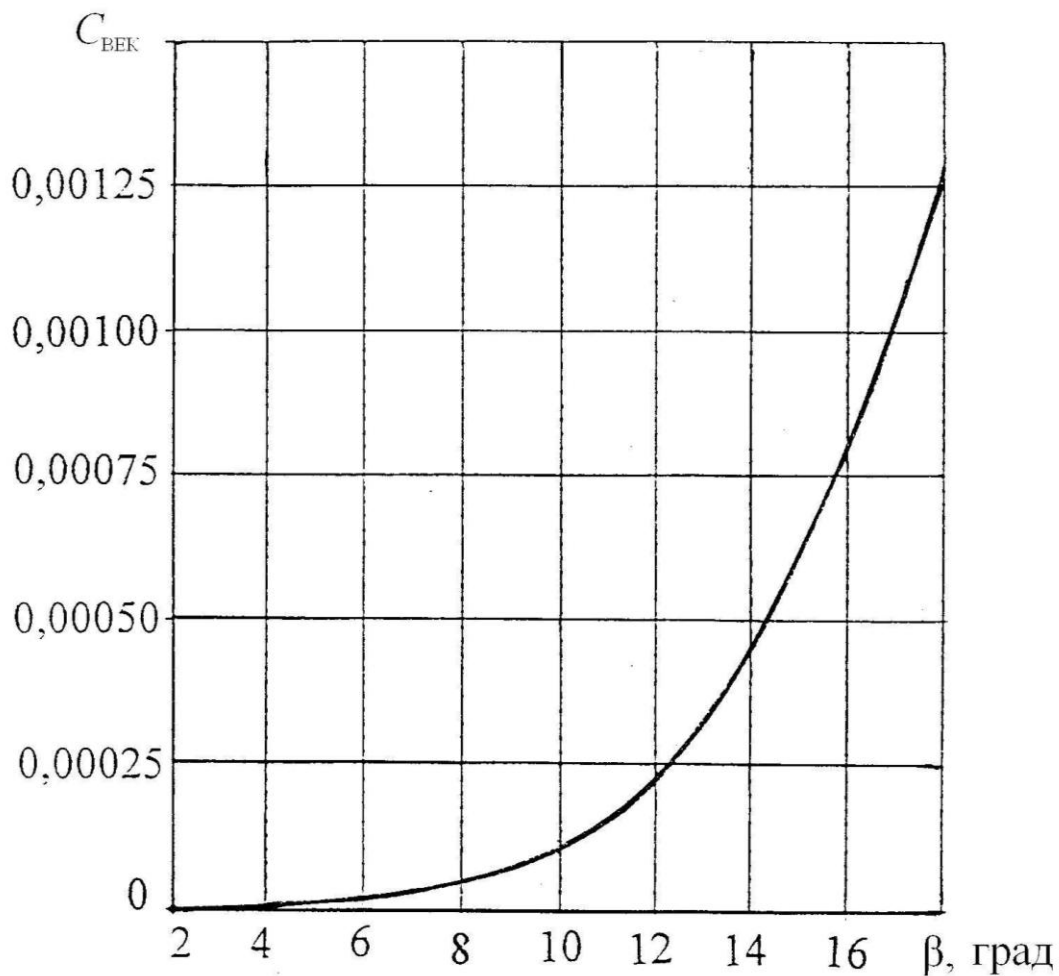


Рис. 2.3. График зависимости расчётной постоянной величины  $C_{\text{BEK}}$  от угла наклона конвейера  $\beta$

С учётом формул (2.23)–(2.26) формула (2.19) для определения уточнённой агрегатной жёсткости  $E_A^*$  принимает следующий вид:

для нижней ветви

$$E_{\text{АН}}^* = \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{C_{\text{PH}}}{S_{\text{H}}^3(x)} + \frac{C_{\text{BEK}}}{S_{\text{H}}(x)}}; \quad (2.30)$$

для верхней загруженной ветви

$$E_{\text{ABГ}}^* = \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{C_{\text{РВГ}}}{S_{\text{ВГ}}^3(y)} + \frac{C_{\text{ВЕК}}}{S_{\text{ВГ}}(y)}}; \quad (2.31)$$

для верхней незагруженной ветви

$$E_{\text{ABH}}^* = \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{C_{\text{РВH}}}{S_{\text{ВH}}^3(y)} + \frac{C_{\text{ВЕК}}}{S_{\text{ВH}}(y)}}. \quad (2.32)$$

## 2.2. Конвейеры для транспортирования груза по уклонам и горизонтальным трассам (программа ГАММА)

Ленточные конвейеры широко применяют в горной промышленности для транспортирования груза по уклонам и горизонтальным трассам. Для угольных шахт в настоящее время выпускают уклонные и горизонтальные конвейеры с жёстким натяжным устройством [26, 42], с возможностью расположения его как в концевой части, так и в непосредственной близости от привода в головной части. На этих конвейерах применяют ленты как резинотканевые, так и резинотросовые.

### 2.2.1. Разгрузка конвейера. Исходные уравнения

На рис. 2.4 изображены равновесные состояния конвейера во время процесса его разгрузки в функции времени  $t$  (с): а) при времени  $t = 0$  – момент времени начала разгрузки (номинальная загрузка); б) при значении времени  $t = R/V$  – частичная загрузка; в) при значении  $t = L/V$  – момент времени окончания разгрузки (холостой ход).

Переходный режим рассматривается как ряд установившихся режимов с различной загрузкой. В интервале изменения времени от значения  $t = 0$  до значения  $t = L/V$  принимается  $m$  интер-

валов равновесных состояний. При этом шаг моделирования  $H$  (с) по времени равняется

$$H = \frac{L}{Vm}, \quad (2.33)$$

где  $L$  – длина конвейера, м;  $V$  – скорость движения ленты, м/с.

При определении натяжения ленты в характерных точках контура за начало отсчёта принято значение натяжения ленты  $S_1$  в точке сбегания ленты с приводного барабана (рис. 2.4). В других характерных точках контура натяжение ленты обозначено символами:  $S_2$ ,  $S_3$  и  $S_4$ . Точка  $r$  является границей раздела плотностей грузовой ветви.  $R$  – длина разгруженного участка верхней ветви, м.

Значение  $R = Vt$  (м) является функцией времени и соответствует каждому рассматриваемому равновесному состоянию в процессе разгрузки конвейера с шагом моделирования  $H$ , с.

При разгрузке конвейера граница плотностей (точка  $r$ ) перемещается. При этом сопротивление движению ленты на грузовой ветви изменяется, вследствие этого изменяется и натяжение ленты в характерных точках замкнутого контура.

Выберем начало координат для системы координат  $OxS$  и  $OyS$  соответственно в точках  $S_1$  и  $S_3$  и направим оси абсцисс  $Ox$ ,  $Oy$  и оси ординат  $OS$ , как показано на рис. 2.4.

У конвейера с жёстким натяжным устройством (натяжная каретка не перемещается) при переходе от установившегося режима работы с номинальной нагрузкой к холостому ходу длина замкнутого контура остаётся неизменной, вследствие этого и сумма упругих деформаций в контуре остаётся неизменной.

Поскольку сумма упругих деформаций ленты является постоянной во время переходного процесса, то правомерны равенства:

$$\left. \begin{aligned} \Sigma \Delta L^{\Gamma}(S_{1A}) &= \Sigma \Delta L^R(S_{1R}); \\ \Sigma \Delta L^{\Gamma}(S_{1A}) &= \Sigma \Delta L^{XX}(S_{1XX}). \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

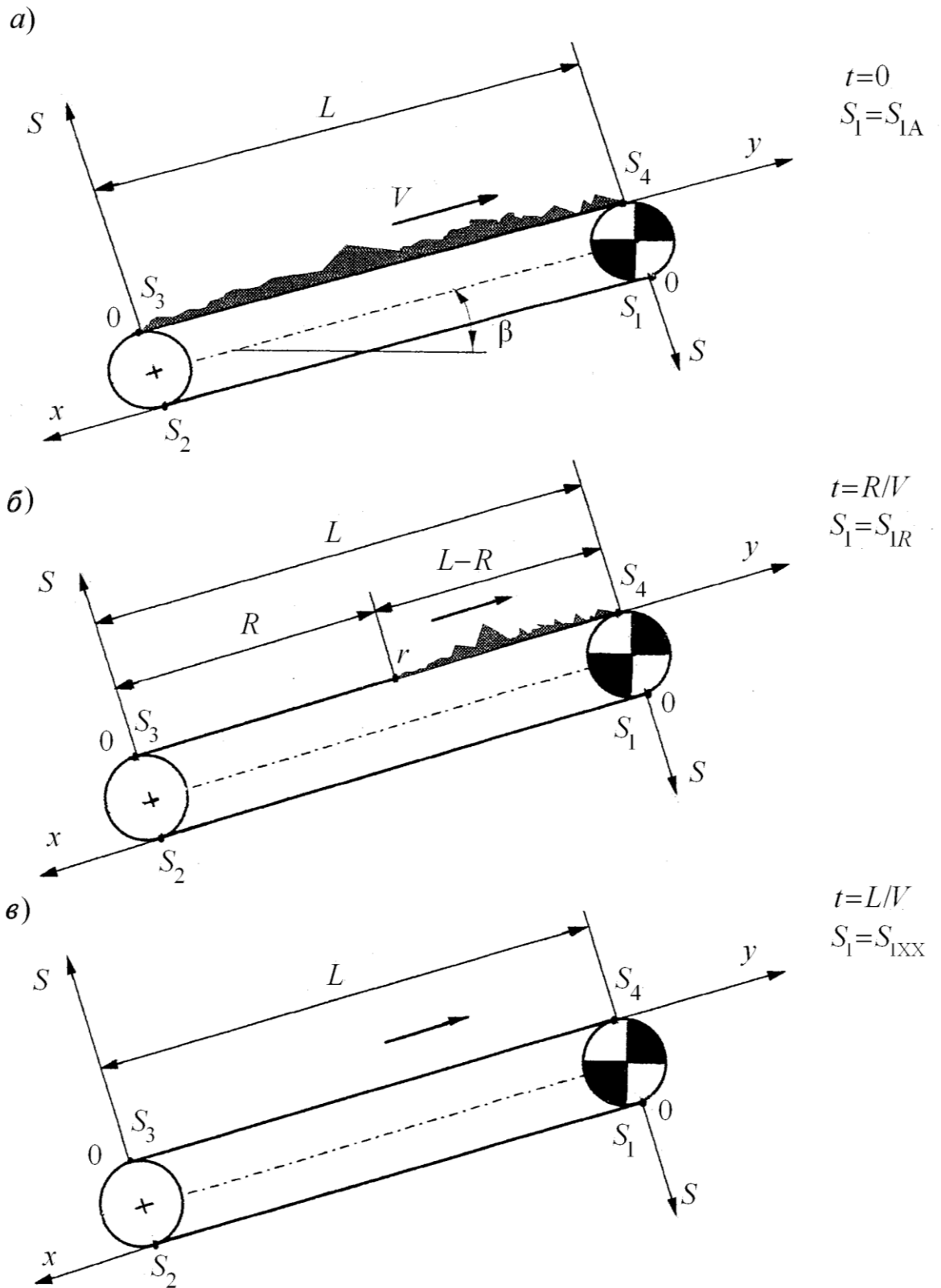


Рис. 2.4. Схемы загрузки уклонного конвейера при разгрузке:

*а* – при номинальной загрузке; *б* – частичной; *в* – холостом ходе

В уравнениях (2.34) приняты обозначения: сумма упругих деформаций ленты  $\Sigma \Delta L^\Gamma(S_{1A})$ ,  $\Sigma \Delta L^R(S_{1R})$  и  $\Sigma \Delta L^{XX}(S_{1XX})$  – соответственно при номинальной загрузенности (рис. 2.4, *а*), частичной (рис. 2.4, *б*) и холостом ходе (рис. 2.4, *в*). При этом натяжения ленты в точке сбегания её с приводного барабана равно  $S_{1A}$ ,  $S_{1R}$  и  $S_{1XX}$  соответственно при загрузенности номинальной, частичной в каждом из равновесных состояний при разгрузке, и холостом ходе.

Натяжение ленты  $S_{1A}$  определяем в результате проведения тягового расчёта ленточного конвейера при выполнении двух условий. Первое условие – обеспечение работы конвейера без пробуксовки ленты на приводном барабане. Второе условие – исключение провеса ленты в контуре сверх допустимого значения, определяемого ОСТ [34].

Прежде чем перейти к определению упругой деформации ленты, остановимся на физическом смысле некоторых понятий. Подставив в формулу (2.3) значение  $E_0$  из формулы (2.1), получим

$$E = Bi \sigma / \varepsilon . \quad (2.35)$$

При  $\varepsilon = 1$  из (2.35) имеем

$$E = Bi \sigma = S , \quad (2.36)$$

где  $E$  – жёсткость ленты (Н), равная натяжению ленты  $S$  (Н), при котором  $\varepsilon = 1$  или, иначе, равная натяжению, при котором напряжения в ленте равны модулю упругости.

Определяемая по формулам (2.3), (2.4) жёсткость является характеристикой ленты в упругой области. Если жёсткости  $E$ , равной натяжению  $S$  ленты, соответствует значение относительной деформации  $\varepsilon = 1$ , то, следовательно, определённому значению натяжения  $S_i$  в замкнутом контуре соответствует определённое значение относительной деформации  $\varepsilon_i = \Delta l_i / l_i$ . Из этого соотношения следует

$$\Delta l_i = \frac{S_i l_i}{E} , \quad (2.37)$$

где  $\Delta l_i$  – абсолютная деформация (м) отрезка ленты длиной  $l_i$ , м;  $S_i$  – натяжение (Н), приложенное к отрезку ленты длиной  $l_i$ , м.

Статическая жёсткость  $E$  ленты может быть определена по нормированному относительному удлинению ленты  $\varepsilon_H$  при номинальном усилии  $S_H$  [16]:

$$E = \frac{S_H}{\varepsilon_H}.$$

В общем случае в соответствии с формулой (2.37) абсолютное упругое удлинение ленты, например, на участке нижней ветви от точки  $x_1$  до точки  $x_2$  в замкнутом контуре можно вычислить следующим образом:

$$\Delta L_{(x_1 - x_2)} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{S(x)}{E(x)} dx, \quad (2.38)$$

где  $S(x)$  – натяжение ленты, как функция текущего значения координаты точки  $x$ , на оси абсцисс  $Ox$  системы координат  $OxS$ ;  $E(x)$  – жёсткость ленты, как функция жёсткости нижней ветви контура ленты.

Суммарную деформацию ленты при номинальной загруженности и холостом ходе определяем как сумму двух интегралов:

при номинальной загруженности

$$\sum \Delta L^\Gamma (S_{1A}) = \int_0^L \frac{S_H(x)}{E_H(x)} dx + \int_0^L \frac{S_B^\Gamma(y)}{E_{B\Gamma}(y)} dy; \quad (2.39)$$

при холостом ходе

$$\sum \Delta L^{xx} (S_{1xx}) = \int_0^L \frac{S_H(x)}{E_H(x)} dx + \int_0^L \frac{S_B(y)}{E_{BH}(y)} dy. \quad (2.40)$$

В формулах (2.39) и (2.40) первый интеграл определяет деформацию нижней ветви, а второй – деформацию верхней ветви. Индекс «Н» соответствует нижней ветви, индекс «В» – верхней загруженной ветви, а «ВН» – верхней незагруженной ветви. Жёсткости  $E_H(x)$ ,  $E_{B\Gamma}(y)$  и  $E_{BH}(y)$  записаны как функции соответствующих ветвей контура ленты.



Натяжение ленты  $S_H(x)$  (ордината) является функцией текущего значения координаты  $x$  на оси абсцисс  $0x$  системы координат  $0xS$ , а  $S_B(y)$  (ордината) – функцией текущего значения координаты  $y$  на оси абсцисс  $0y$  системы координат  $0yS$ .

При номинальной загруженности конвейера натяжение ленты  $S_H(x)$  и  $S_B(y)$  определяют следующим образом (рис. 2.4, а):

на нижней ветви

$$\left. \begin{aligned} S_H(x=0) &= S_{1A}, \\ S_H(x) &= S_{1A} + W_H^{yД} x, \\ S_H(x=L) &= S_{1A} + W_H^{yД} L; \end{aligned} \right\} \quad (2.41)$$

на верхней ветви

$$\left. \begin{aligned} S_B^\Gamma(y=0) &= (S_{1A} + W_H^{yД} L)k, \\ S_B^\Gamma(y) &= (S_{1A} + W_H^{yД} L)k + W_{B\Gamma}^{yД} y, \\ S_B^\Gamma(y=L) &= (W_H^{yД} L)k + W_{B\Gamma}^{yД} L. \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

При холостом ходе конвейера (рис. 2.4, в):

на нижней ветви

$$\left. \begin{aligned} S_H(x=0) &= S_{1XX}, \\ S_H(x) &= S_{1XX} + W_H^{yД} x, \\ S_H(x=L) &= S_{1XX} + W_H^{yД} L; \end{aligned} \right\} \quad (2.43)$$

для верхней ветви

$$\left. \begin{aligned} S_B(y=0) &= (S_{1XX} + W_H^{yД} L)k, \\ S_B(y) &= (S_{1XX} + W_H^{yД} L)k + W_{B\Gamma}^{yД} y, \\ S_B(y=L) &= (S_{1XX} + W_H^{yД} L)k + W_{B\Gamma}^{yД} L. \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

Подставив в формулу (2.39) соответствующие значения из формул (2.41), (2.42), получим

$$\sum \Delta L^\Gamma(S_{1A}) = \int_0^L \frac{S_{1A} + W_H^{yD} x}{E_H(x)} dx + \int_0^L \frac{(S_{1A} + W_H^{yD} L)k + W_{BH}^{yD} y}{E_{BH}(y)} dy. \quad (2.45)$$

Вычисленное по формуле (2.45) значение  $\sum \Delta L^\Gamma(S_{1A})$  используем в дальнейшем как основу всех расчётов.

Подставив в формулу (2.40) значения из формул (2.43) и (2.44), получим

$$\sum \Delta L^{xx}(S_{1XX}) = \int_0^L \frac{S_{1XX} + W_H^{yD} x}{E_H(x)} dx + \int_0^L \frac{(S_{1XX} + W_H^{yD} L)k + W_{BH}^{yD} y}{E_{BH}(y)} dy. \quad (2.46)$$

С учётом (2.34) в левой части уравнения (2.46)  $\sum \Delta L^{xx}(S_{1XX})$  заменяем значением  $\sum \Delta L^\Gamma(S_{1A})$ .

При этом получим

$$\sum \Delta L^\Gamma(S_{1A}) = \int_0^L \frac{S + W_H^{yD} x}{E_H(x)} dx + \int_0^L \frac{(S + W_H^{yD} L)k + W_{BH}^{yD} y}{E_{BH}(y)} dy, \quad (2.47)$$

где  $S$  – искомое значение натяжения ленты  $S_{1XX}$  в точке  $S_1$  при холостом ходе конвейера.

Из уравнения (2.47) определяем значение  $S_{1XX}$  по известному значению  $\sum \Delta L^\Gamma(S_{1A})$ .

В формулах (2.45), (2.46), (2.47) приняты следующие обозначения:  $W_H^{yD}$ ,  $W_{BH}^{yD}$  и  $W_{BH}^{yD}$  – удельные силы сопротивления движению ленты (Н/м) соответственно на нижней ветви, загруженной и незагруженной верхней ветви, определяемые при выполнении тягового расчёта конвейера;  $k$  – коэффициент, учитывающий увеличение натяжения ленты за счёт действия сил сопротивления движению на концевом барабане ( $k = 1,03$ ).

При разгрузке конвейера граница раздела плотностей сред верхней ветви (точка  $r$ ) движется со скоростью движения ленты  $V$  (рис. 2.4, б), сумма упругих деформаций складывается из деформаций ленты на трёх участках: нижней ветви; разгруженного

и неразгруженного участков верхней ветви. Для определения суммы деформаций необходимо произвести интегрирование для каждого участка.

В общем случае, сумма упругих деформаций

$$\sum \Delta L^R(S) = \int_0^L \frac{S_H(x)}{E_H(x)} dx + \int_0^R \frac{S_B(y)}{E_{BH}(y)} dy + \int_R^L \frac{S_B^\Gamma(y)}{E_{B\Gamma}(y)} dy. \quad (2.48)$$

Первый интеграл (2.48) определяет деформацию нижней ветви ленты (м), второй – деформацию незагруженного участка верхней ветви, а третий – загруженного участка верхней ветви.

Натяжение ленты  $S_H(x)$ ,  $S_B(y)$  и  $S_B^\Gamma(y)$  выражаем как функцию соответствующих значений координат точек на оси абсцисс:

на нижней ветви

$$\left. \begin{aligned} S_H(x=0) &= S, \\ S_H(x) &= S + W_H^{yД} x, \\ S_H(x=L) &= S + W_H^{yД} L; \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

на незагруженной части верхней ветви

$$\left. \begin{aligned} S_H(y=0) &= (S + W_H^{yД} L)k, \\ S_B(y) &= (S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} y, \\ S_B(y=R) &= (S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} R; \end{aligned} \right\} \quad (2.50)$$

на загруженной части верхней ветви

$$\left. \begin{aligned} S_B^\Gamma(y) &= (S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} R + W_{B\Gamma}^{yД} y, \\ S_B^\Gamma(y=L) &= (S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} L. \end{aligned} \right\} \quad (2.51)$$

Подставив в формулу (2.48) соответствующие значения из (2.49), (2.50) и (2.51), получим

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta L^R(S) = & \int_0^L \frac{S + W_H^{yD} x}{E_H(x)} dx + \int_0^R \frac{(S + W_H^{yD} L)k + W_{BH}^{yD} y}{E_{BH}(y)} dy + \\ & + \int_R^L \frac{(S + W_H^{yD} L)k + W_{BH}^{yD} R + W_{BF}^{yD} y}{E_{BF}(y)} dy. \end{aligned} \quad (2.52)$$

С учётом (2.34) в левой части уравнения (2.52) значение  $\Sigma \Delta L^R(S_{1R})$  заменяем  $\Sigma \Delta L^\Gamma(S_{1A})$ .

При этом получаем

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta L^\Gamma(S_{1A}) = & \int_0^L \frac{S + W_H^{yD} x}{E_H(x)} dx + \int_0^R \frac{(S + W_H^{yD} L)k + W_{BH}^{yD} y}{E_{BH}(y)} dy + \\ & + \int_R^L \frac{(S + W_H^{yD} L)k + W_{BH}^{yD} R + W_{BF}^{yD} y}{E_{BF}(y)} dy. \end{aligned} \quad (2.53)$$

Решаем уравнение (2.53) относительно неизвестной величины  $S$  для каждого равновесного состояния, определяемого значением  $R = Vt$ , и определяем значение натяжения ленты в характерных точках замкнутого контура:

$$\left. \begin{aligned} S_1 = S = S_{1R}, \\ S_2 = S_1 + W_H^{yD} L, \\ S_3 = (S_1 + W_H^{yD} L)k, \\ S_4 = (S_1 + W_H^{yD} L)k + W_{BH}^{yD} R + W_{BF}^{yD} (L - R). \end{aligned} \right\} \quad (2.54)$$

$$S_R = (S_1 + W_H^{yD} L)k + W_{BH}^{yD} R. \quad (2.54')$$

По полученным для каждого равновесного состояния значениям  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  и  $S_R$  можно строить соответствующие графики изменения натяжения ленты в характерных точках в функции времени разгрузки  $t$ , от значения  $t = t_R = 0$  до значения  $t = t_R = L/V$  через мерный интервал времени (шаг  $H$ ), определяемый по формуле (2.33) (рис. 2.12):

$$S_1 = f(t_R), S_2 = f(t_R), S_3 = f(t_R), S_4 = f(t_R), S_R = f(t_R). \quad (2.55)$$

## 2.2.2. Загрузка конвейера. Исходные уравнения

На рис. 2.5 изображены равновесные состояния конвейера во время процесса его загрузки в функции времени  $t$  (с): *а*) при значении  $t = 0$  – момент времени начала загрузки (холостой ход); *б*) при значении времени  $t = Z/V$  (частичная загруженность); *в*) при значении  $t = L/V$  – момент времени окончания загрузки (номинальная загруженность). В интервале изменения времени от значения  $t = 0$  до значения  $t = L/V$  рассматриваем равновесное состояние конвейера через каждый шаг  $H$ .

При загрузке, как и при разгрузке, сумму деформаций  $\sum \Delta L^Z(S)$  определяем как сумму трёх интегралов, проводя интегрирование для трёх участков замкнутого контура ленты: участка нижней ветви в пределах от 0 до  $L$  (рис. 2.5, *а*); загруженного участка верхней ветви в пределах от 0 до  $Z = Vt$  (рис. 2.5, *б*); незагруженного участка верхней ветви в пределах от  $Z$  до  $L$  (рис. 2.5, *в*).

$$\sum \Delta L^Z(S) = \int_0^L \frac{S_H(x)}{E_H(x)} dx + \int_0^Z \frac{S_B^\Gamma(y)}{E_{B\Gamma}(y)} dy + \int_Z^L \frac{S_B(y)}{E_{BH}(y)} dy. \quad (2.56)$$

Натяжения ленты  $S_H(x)$ ,  $S_B^\Gamma(y)$ ,  $S_B(y)$  определяем по формулам: для нижней ветви

$$\left. \begin{aligned} S_H(x=0) &= S, \\ S_H(x) &= S + W_H^{\text{уд}} x, \\ S_H(x=L) &= S + W_H^{\text{уд}} L; \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

для загруженной части верхней ветви

$$\left. \begin{aligned} S_B^\Gamma(y=0) &= (S + W_H^{\text{уд}} L)k, \\ S_B^\Gamma(y) &= (S + W_H^{\text{уд}} L)k + W_{B\Gamma}^{\text{уд}} y, \\ S_B^\Gamma(y=Z) &= (S + W_H^{\text{уд}} L)k + W_{B\Gamma}^{\text{уд}} Z; \end{aligned} \right\} \quad (2.58)$$

для незагруженной части верхней ветви

$$\left. \begin{aligned} S_B(y) &= (S + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} Z + W_{BН}^{yД} y, \\ S_B(y=L) &= (S_1 + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} L. \end{aligned} \right\} \quad (2.59)$$

Подставив в формулу (2.56) соответствующие значения из (2.57), (2.58), (2.59), получим

$$\begin{aligned} \sum \Delta L^Z(S) &= \int_0^L \frac{S + W_H^{yД} x}{E_H(x)} dx + \int_0^Z \frac{(S + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} y}{E_{BГ}(y)} dy + \\ &+ \int_Z^L \frac{(S + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} Z + W_{BН}^{yД} y}{E_{BН}(y)} dy. \end{aligned} \quad (2.60)$$

С учётом уравнения (2.34) значение в левой части  $\sum \Delta L^Z(S)$  уравнения (2.60) заменяем  $\sum \Delta L^\Gamma(S_{1A})$ . При этом получаем

$$\begin{aligned} \sum \Delta L^\Gamma(S_{1A}) &= \int_0^L \frac{S + W_H^{yД} x}{E_H(x)} dx + \int_0^Z \frac{(S + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} y}{E_{BГ}(y)} dy + \\ &+ \int_Z^L \frac{(S + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} Z + W_{BН}^{yД} y}{E_{BН}(y)} dy. \end{aligned} \quad (2.61)$$

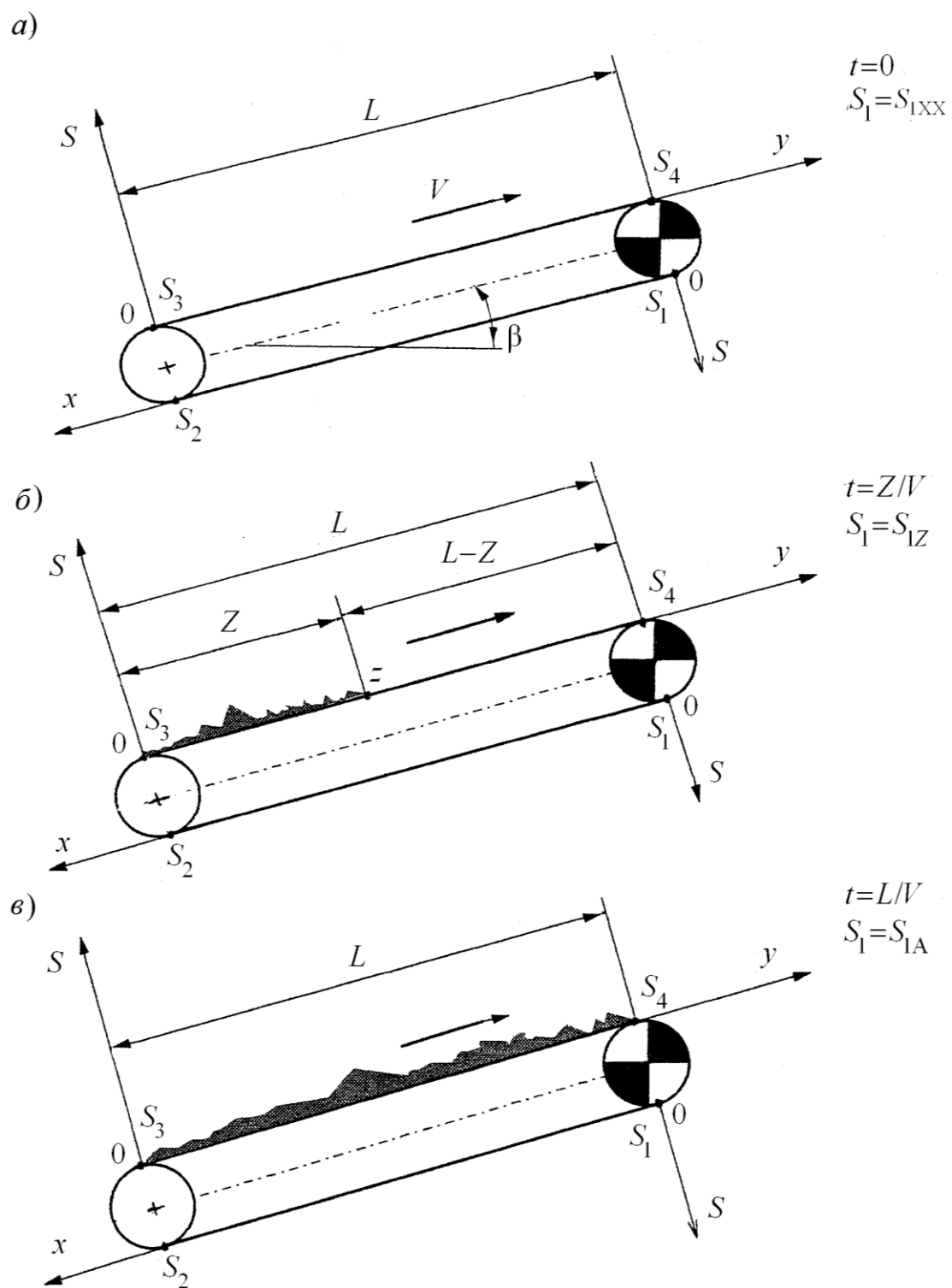


Рис. 2.5. Схемы загрузки уклонного конвейера при загрузке:  
 а – при холостом ходе;  
 б – при частичной загрузке;  
 в – номинальной

Для каждого равновесного состояния при решении (2.61) вычисляем значение  $S = S_{1Z}$  и определяем значения натяжения ленты в характерных точках контура по формулам

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= S, \\ S_2 &= S_1 + W_H^{yД} L, \\ S_3 &= (S_1 + W_H^{yД} L)k, \\ S_4 &= (S_1 + W_H^{yД} L)k + W_{ВГ}^{yД} Z + W_{ВГ}^{yД} (L - Z); \end{aligned} \right\} \quad (2.62)$$

$$S_Z = (S_1 + W_H^{yД} L)k + W_{ВГ}^{yД} Z. \quad (2.63)$$

По полученным для каждого равновесного состояния значениям  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  и  $S_Z$  можно строить соответствующие графики изменения натяжения ленты в характерных точках в функции времени загрузки  $t$ , от значения  $t = t_Z = 0$  до значения  $t = t_Z = L/V$ , через мерный интервал времени (шаг  $H$ ), определяемый по формуле (2.33) (рис. 2.12):

$$S_1 = f(t_Z), S_2 = f(t_Z), S_3 = f(t_Z), S_4 = f(t_Z), S_Z = f(t_Z). \quad (2.64)$$

### 2.2.3. Методы вычисления интегралов и решения алгебраических уравнений

Широко известными методами для приближённого подсчёта определённых интегралов являются методы прямоугольников, трапеций, парабол (Симпсона) [43, 44 и др.]. В работе для вычисления определённых интегралов отдано предпочтение методу Симпсона с автоматическим выбором шага, обеспечивающему заданную точность при рациональных затратах времени на вычисление.

При математическом описании переходных режимов во время разгрузки и загрузки конвейера для определения натяжения ленты получаются сложные зависимости, решение которых классическими методами выражается нелинейными уравнениями пятой степени, которые совершенно неприемлемы для практического использования. В настоящее время для решения алгебраических уравне-



ний применяют различные численные методы: половинного деления; Ньютона; итерации. В работе в качестве основного метода уточнения корня уравнения при моделировании процессов изменения натяжения ленты при разгрузке и загрузке конвейера принят метод половинного деления, широко распространённый, не имеющий ограничений и отличающийся простотой [43].

Для подтверждения достоверности полученного значения натяжения ленты  $S_1$  при холостом ходе конвейера, полученного моделированием процесса изменения натяжения ленты при разгрузке конвейера, используется независимая программа. В качестве независимой программы используется решение полинома четвёртой степени, описывающего работу конвейера в режиме холостого хода и решаемого относительно значения  $S_1$ . В случае совпадения результатов расчёта по обеим программам подтверждается достоверность расчёта.

Для нахождения всех корней полинома с действительными коэффициентами в данной работе при реализации Фортрана *Microsoft Fortran Power Station* версии 4.0 использована подпрограмма «ZPLRC», которая находится в библиотеке *IMSL* профессиональной версии *FPS*.

При обращении к подпрограмме «ZPLRC» выводятся на экран в специальное окно (с черным полем) все четыре корня уравнения в виде матрицы в один столбец и одновременно на печать, в поле трассировки распечатки результатов расчёта по программе *GAMMA* (прил. 7, первый лист).

#### **2.2.4. Подынтегральные функции и контрольные зависимости без учёта провеса ленты между роlikоопорами**

При рассмотрении варианта без учёта провеса ленты принимаем следующие допущения: лента рассматривается как стержень с жёсткостью  $E$ , и коэффициент сопротивления движению  $\varpi$  не зависит от натяжения ленты. При этом принимаем  $E_H(x) = E_B(y) = E$ , и уравнения (2.45), (2.47), (2.52), (2.60) принимают вид

$$\sum \Delta L_B^\Gamma(S_{1A}) = \int_0^L \frac{S_{1A} + W_H^{yД} x}{E} dx + \int_0^L \frac{(S_{1A} + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} y}{E} dy; \quad (2.65)$$

$$\sum \Delta L_B^\Gamma(S_{1A}) = \int_0^L \frac{S + W_H^{yД} x}{E} dx + \int_0^L \frac{(S + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} y}{E} dy; \quad (2.66)$$

$$\begin{aligned} \sum \Delta L_B^\Gamma(S_{1A}) = & \int_0^L \frac{S + W_H^{yД} x}{E} dx + \int_0^R \frac{(S + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} y}{E} dy + \\ & + \int_R^L \frac{(S + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} R + W_{BГ}^{yД} y}{E} dy. \end{aligned} \quad (2.67)$$

$$\begin{aligned} \sum \Delta L_B^\Gamma(S_{1A}) = & \int_0^L \frac{S + W_H^{yД} x}{E} dx + \int_0^Z \frac{(S + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} y}{E} dy + \\ & + \int_Z^L \frac{(S + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} Z + W_{BГ}^{yД} y}{E} dy. \end{aligned} \quad (2.68)$$

Значение  $E$  определяем по формуле (2.3) или (2.4) в зависимости от типа применяемой ленты.

Для написания внешних подпрограмм-функций, используемых при решении интегралов и алгебраических уравнений, введены следующие обозначения для подынтегральных функций.

В уравнении (2.65):

$$F \text{ № } 1(x) = (S_{1A} + W_H^{yД} x)/E.$$

$$F \text{ № } 2(y) = [(S_{1A} + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} y]/E.$$

В уравнении (2.66):

$$F \text{ № } 3(x) = (S + W_H^{yД} x)/E.$$

$$F \text{ № } 4(y) = [(S + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} y]/E.$$

В уравнении (2.67):

$$F \text{ № } 3(x) = (S + W_{\text{H}}^{\text{уд}} x)/E.$$

$$F \text{ № } 4(y) = [(S + W_{\text{H}}^{\text{уд}} L)k + W_{\text{ВГ}}^{\text{уд}} y]/E.$$

$$F \text{ № } 5(y) = [(S + W_{\text{H}}^{\text{уд}} L)k + W_{\text{ВГ}}^{\text{уд}} R + W_{\text{ВГ}}^{\text{уд}} y]/E.$$

В уравнении (2.68):

$$F \text{ № } 3(x) = (S + W_{\text{H}}^{\text{уд}} x)/E.$$

$$F \text{ № } 6(y) = [(S + W_{\text{H}}^{\text{уд}} L)k + W_{\text{ВГ}}^{\text{уд}} y]/E.$$

$$F \text{ № } 7(y) = [(S + W_{\text{H}}^{\text{уд}} L)k + W_{\text{ВГ}}^{\text{уд}} Z + W_{\text{ВГ}}^{\text{уд}} y]/E.$$

Вычисляем по формуле (2.65) значение  $\Sigma \Delta L_{\text{В}}^{\Gamma}(S_{1\text{А}})$ . Используя полученное значение, решаем уравнение (2.66). В результате решения определяем величину  $S$ , которая является натяжением ленты в точке  $S_{1\text{ХХ}}$  при холостом ходе конвейера. Значения  $\Sigma \Delta L_{\text{В}}^{\Gamma}(S_{1\text{А}})$  и  $S_{1\text{ХХ}}$  приведены в таблице (прил. 7, третий лист) в столбце «Без учёта провеса» ниже надписи «Значения характеристик ...» в строках пунктов 1 и 2 и идентифицированы соответственно как  $DLT = \Sigma \Delta L_{\text{В}}^{\Gamma}(S_{1\text{А}})$  и  $S_{10} = S_{1\text{ХХ}}$ .

При моделировании процесса разгрузки и загрузки используем формулы соответственно (2.67) и (2.68). Показатели моделирования процессов разгрузки и загрузки конвейера без учёта провисания ленты между роlikоопорами приведены в таблице (прил. 7, четвёртый лист).

В качестве контрольных показателей приняты значения  $\Sigma \Delta L_{\text{В}}^{\Gamma}(S_{1\text{А}})_{\text{контр}}$  и  $(S_{1\text{ХХ}})_{\text{контр}}$ . Проинтегрировав (2.65), получим

$$\Sigma \Delta L_{\text{В}}^{\Gamma}(S_{1\text{А}})_{\text{контр}} = \frac{L}{E} \left[ (1+k)S_{1\text{А}} + \frac{(1+2k)W_{\text{H}}^{\text{уд}}L}{2} + \frac{W_{\text{ВГ}}^{\text{уд}}L}{2} \right]. \quad (2.69)$$

Проинтегрировав (2.66), получим

$$\sum \Delta L_B^\Gamma(S_{1A}) = \frac{L}{E} \left[ (1+k)S + \frac{(1+2k)W_H^{yД}L}{2} + \frac{W_{BH}^{yД}L}{2} \right]. \quad (2.70)$$

Приравняв правые части уравнений (2.69) и (2.70) и решая полученное равенство относительно  $S = (S_{1XX})_{\text{контр}}$ , получим

$$(S_{1XX})_{\text{контр}} = S_{1A} + \frac{W_{BG}^{yД}L}{2(1+k)} - \frac{W_H^{yД}L}{2(1+k)}. \quad (2.71)$$

Значения, полученные при расчёте по формулам (2.69) и (2.71), приведены в таблице (прил. 7, третий лист) в столбце «Без учёта провеса» ниже надписи «Контрольные значения» в строках пунктов 1К и 2К и идентифицированы как  $S_{10K} = (S_{1XX})_{\text{контр}}$  и  $DLT K = \sum \Delta L_B^\Gamma(S_{1A})_{\text{контр}}$ .

### 2.2.5. Подынтегральные функции и контрольные зависимости с учётом провеса ленты

При рассмотрении варианта с учётом провеса ленты принимаем, что лента провисает между роликами и смещение сечений ленты при изменении её натяжения складывается из упругих продольных деформаций и перемещения вследствие выборки стрелок провеса ленты между роликами. При проведении расчётов вводится понятие агрегатной жёсткости ленты (2.18).

С учётом (2.27), (2.28), (2.29) в уравнениях (2.45), (2.47), (2.52), (2.60) принимаем  $E_H(x) = E_{AH}$ ,  $E_{BG}(y) = E_{ABG}$ ,  $E_{BH}(y) = E_{ABH}$  и, проведя ряд преобразований, получим

из уравнения (2.45)

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta L_A^\Gamma(S_{1A}) = & \int_0^L \left[ (S_{1A} + W_H^{yД} x) \frac{1}{E} + \frac{C_{AH}}{(S_{1A} + W_H^{yД} x)^2} \right] dx + \\ & + \int_0^L \left\{ \left[ (S_{1A} + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} y \right] \frac{1}{E} + \right. \\ & \left. + \frac{C_{ABГ}}{\left[ (S_{1A} + W_H^{yД} L)k + W_{BГ}^{yД} y \right]^2} \right\} dy; \end{aligned} \quad (2.72)$$

из уравнения (2.47)

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta L_A^\Gamma(S_{1A}) = & \int_0^L \left[ \frac{1}{E}(S + W_H^{yД} x) + \frac{C_{AH}}{(S + W_H^{yД} x)^2} \right] dx + \\ & + \int_0^L \left\{ \left( (k(S + W_H^{yД} L) + W_{BН}^{yД} y) \frac{1}{E} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{C_{ABН}}{((S + W_H^{yД} L)k + W_{BН}^{yД} y)^2} \right) \right\} dy; \end{aligned} \quad (2.73)$$

из уравнения (2.52)

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta L_A^\Gamma(S_{1A}) = & \int_0^L \left[ \frac{1}{E}(S + W_H^{yД} x) + \frac{S_{AH}}{(S + W_H^{yД} x)^2} \right] dx + \\ & + \int_0^R \left\{ (k(S + W_H^{yД} L) + W_{BН}^{yД} y) \frac{1}{E} + \frac{C_{ABН}}{(k(S + W_H^{yД} L) + W_{BН}^{yД} y)^2} \right\} dy + \end{aligned}$$

$$+ \int_R^L \left\{ \frac{(k(S + W_H^{yD} L) + W_{BH}^{yD} R + W_{BF}^{yD} y) \frac{1}{E} + C_{AB\Gamma}}{(k(S + W_H^{yD} L) + W_{BH}^{yD} R + W_{BF}^{yD} y)^2} \right\} dy; \quad (2.74)$$

из уравнения (2.60)

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta L_A^\Gamma (S_{1A}) = & \int_0^L \left[ (S + W_H^{yD} x) \frac{1}{E} + \frac{C_{AH}}{(S + W_H^{yD} x)^2} \right] dx + \\ & + \int_0^Z \left\{ (k(S + W_H^{yD} L) + W_{BF}^{yD} y) \frac{1}{E} + \frac{C_{AB\Gamma}}{(k(S + W_H^{yD} L) + W_{BF}^{yD} y)^2} \right\} dy + \\ & + \int_Z^L \left\{ \frac{(k(S + W_H^{yD} L) + W_{BF}^{yD} Z + W_{BH}^{yD} y) \frac{1}{E} + C_{ABH}}{(k(S + W_H^{yD} L) + W_{BF}^{yD} Z + W_{BH}^{yD} y)^2} \right\} dy. \quad (2.75) \end{aligned}$$

При написании внешних подпрограмм-функций, используемых для решения интегралов и алгебраических уравнений, вводим следующие обозначения подынтегральных функций.

В уравнении (2.72):

$$F \text{ № } 8(x) = (S_{1A} + W_H^{yD} x)/E + \frac{C_{AH}}{(S_{1A} + W_H^{yD} x)^2}.$$

$$F \text{ № } 9(y) = ((S_{1A} + W_H^{yD} L)k + W_{BF}^{yD} y)/E +$$

$$+ \frac{C_{AB\Gamma}}{\left[ (S_{1A} + W_H^{yD} L)k + W_{BF}^{yD} y \right]^2}.$$

В уравнении (2.73):

$$F \text{ № } 10(x) = (S + W_H^{yД} x)/E + \frac{C_{AH}}{(S + W_H^{yД} x)^2}.$$

$$F \text{ № } 11(y) = ((S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} y)/E + \\ + \frac{C_{ABH}}{((S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} y)^2}.$$

В уравнении (2.74):

$$F \text{ № } 10(x) = (S + W_H^{yД} x)/E + \frac{C_{AH}}{(S + W_H^{yД} x)^2}.$$

$$F \text{ № } 11(y) = ((S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} y)/E + \\ + \frac{C_{ABH}}{((S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} y)^2}.$$

$$F \text{ № } 12(y) = (S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} R + W_{BF}^{yД} y/E + \\ + \frac{C_{ABГ}}{((S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} R + W_{BF}^{yД} y)^2}.$$

В уравнении (2.75):

$$F \text{ № } 10(x) = (S + W_H^{yД} x)/E + \frac{C_{AH}}{(S + W_H^{yД} x)^2}.$$

$$F \text{ № } 13(y) = (S + W_H^{yД} L)k + W_{BF}^{yД} y/E + \\ + \frac{C_{ABГ}}{((S + W_H^{yД} L)k + W_{BF}^{yД} y)^2}.$$

$$F \text{ № } 14(y) = ((S + W_{\text{H}}^{\text{yД}} L)k + W_{\text{BГ}}^{\text{yД}} Z + W_{\text{BН}}^{\text{yД}} y) / E + \\ + \frac{C_{\text{ABH}}}{((S + W_{\text{H}}^{\text{yД}} L)k + W_{\text{BГ}}^{\text{yД}} Z + W_{\text{BН}}^{\text{yД}} y)^2}.$$

Уравнения (2.73), (2.74), (2.75) решаем методом половинного деления. Значения, полученные при решении уравнений (2.72) и (2.73), приведены в таблице (прил. 7, третий лист) в столбце «С учётом провеса» ниже надписи «Значения характеристик ...» в строках пунктов 1 и 2 и идентифицированы соответственно как  $DLT = \sum \Delta L_A^{\Gamma}(S_{1A})$  и  $S_{10} = S_{1\text{XX}}$ .

При моделировании процесса разгрузки и загрузки используем формулы соответственно (2.74) и (2.75). Показатели моделирования процессов разгрузки и загрузки конвейера с учётом провисания ленты между роlikоопорами приведены в таблице (прил. 7, пятый лист).

В качестве контрольных чисел приняты значения  $\sum \Delta L_A^{\Gamma}(S_{1A})_{\text{контр}}$  и  $(S_{1\text{XX}})_{\text{контр}}$ . Проинтегрировав уравнение (2.72) и проведя ряд соответствующих преобразований, получим формулу

$$\sum \Delta L_A^{\Gamma}(S_{1A}) = \frac{L(A S_{1A}^4 + B S_{1A}^3 + C S_{1A}^2 + D S_{1A} + G)}{E S_{1A} (S_{1A} + W_{\text{H}}) [(S_{1A} + W_{\text{H}})k + W_{\text{BГ}}]}, \quad (2.76)$$

где  $A = k(1+k)$ ;

$$B = \frac{k(5+6k)}{2} W_{\text{H}} + \frac{2+3k}{2} W_{\text{BГ}};$$

$$C = k(2+3k) W_{\text{H}}^2 + \frac{3+6k}{2} W_{\text{H}} W_{\text{BГ}} + \frac{1}{2} W_{\text{BГ}}^2;$$

$$D = \frac{k(1+2k)}{2} W_{\text{H}}^3 + \frac{1+3k}{2} W_{\text{H}}^2 W_{\text{BГ}} + \frac{1}{2} W_{\text{H}} W_{\text{BГ}}^2 +$$

$$+ E(kC_{\text{AH}} + C_{\text{ABГ}} / k);$$



$$G = EC_{\text{АН}}(kW_{\text{Н}} + W_{\text{ВГ}}),$$

где  $W_{\text{Н}}$  и  $W_{\text{ВГ}}$  – суммарное сопротивление движению соответственно нижней и верхней загруженной ветвей ленты;  $C_{\text{АН}}$  и  $C_{\text{АВГ}}$  – значения, определяемые соответственно по формулам (2.20) и (2.21).

Проинтегрировав (2.73) и проведя ряд преобразований, получим полином четвертой степени (2.77), при решении которого один из корней является решением:  $(S_{1\text{XX}})_{\text{контр}}$ .

$$AS^4 + BS^3 + CS^2 + DS + G = 0, \quad (2.77)$$

где  $A = k + k^2$ ;

$$B = \frac{5k + 6k^2}{2}W_{\text{Н}} + \frac{2 + 3k}{2}W_{\text{ВН}} - kE \frac{\sum \Delta L^{\Gamma}(S_{1\text{А}})}{L};$$

$$C = (2k + 3k^2)W_{\text{Н}}^2 + \frac{3 + 6k}{2}W_{\text{Н}}W_{\text{ВН}} + \frac{1}{2}W_{\text{ВН}}^2 - \\ - E \frac{\sum \Delta L^{\Gamma}(S_{1\text{А}})}{L}(2kW_{\text{Н}} + W_{\text{ВН}});$$

$$D = \frac{k + 2k^2}{2}W_{\text{Н}}^3 + \frac{1 + 3k}{2}W_{\text{Н}}^2W_{\text{ВН}} + \frac{1}{2}W_{\text{Н}}W_{\text{ВН}}^2 + E(kC_{\text{АН}} + \\ + C_{\text{АВН}}/k) - E \frac{\sum \Delta L^{\Gamma}(S_{1\text{А}})}{L}(kW_{\text{Н}}^2 + W_{\text{Н}}W_{\text{ВН}});$$

$$G = E(kW_{\text{Н}} + W_{\text{ВН}})C_{\text{АН}},$$

где  $W_{\text{ВН}}$  – суммарное сопротивление движению верхней незагруженной ветви;  $C_{\text{АВН}}$  – значение, определяемое по формуле (2.22).

Аналогичные формулы (2.76) и (2.77) получены в работе [17].

Полином (2.77) решается по подпрограмме «ZPLRC» (для *Find the zeros a polynomial*) из математической библиотеки *IMSL* профессиональной версии Фортрана *FPS*. Значения всех корней полинома

печатаются на поле трассировки распечатки результатов расчёта (прил. 7, первый лист).

Значения, полученные при расчёте по формулам (2.76) и (2.77), приведены в таблице (прил. 7, третий лист) в столбце «С учётом провеса» ниже надписи «Контрольные значения» в строках пунктов 1К и 2К и идентифицированы как  $S_{10K} = (S_{1XX})_{\text{контр}}$  и  $DLT K = \sum \Delta L_A^{\Gamma} (S_{1A})_{\text{контр}}$ .

### 2.2.6. Подынтегральные функции и контрольные зависимости с учётом уточнения провеса ленты

При рассмотрении варианта с учётом уточнения провеса ленты принимается, что лента провисает между роlikоопорами и смещение сечения ленты при изменении натяжения складывается из упругих продольных деформаций и перемещения вследствие выборки стрел провеса ленты между роlikоопорами.

При проведении расчётов вводится понятие агрегатной жёсткости, т. е. аналогично второму варианту, но дополнительно учитывается уточнённое значение условной жёсткости ленты как нерастяжимой нити, свободно лежащей на роlikоопорах, описываемой квадратичной параболой.

С учётом (2.30), (2.31), (2.32) в уравнениях (2.45), (2.47), (2.52), (2.60) принимаем  $E_H(x) = E_{AH}^*$ ,  $E_{BG}(y) = E_{ABG}^*$ ,  $E_{BH}(y) = E_{ABH}^*$ , и, проведя ряд преобразований, получим:

из уравнения (2.45)

$$\sum \Delta L_P^{\Gamma} (S_{1A}) = \int_0^L \left[ (S_{1A} + W_H^{\text{уд}} x) \frac{1}{E} + \frac{C_{PH}}{(S_{1A} + W_H^{\text{уд}} x)^2} + C_{BEK} \right] dx +$$

$$+ \int_0^L \left\{ \frac{((S_{1A} + W_H^{\text{уд}} L)k + W_{BG}^{\text{уд}} y) \frac{1}{E} + C_{PBG}}{((S_{1A} + W_H^{\text{уд}} L)k + W_{BG}^{\text{уд}} y)^2} + C_{BEK} \right\} dy; \quad (2.78)$$

из уравнения (2.47)

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta L_P^\Gamma(S_{1A}) = & \int_0^L \left[ (S + W_H^{yД} x) \frac{1}{E} + \frac{C_{PH}}{(S + W_H^{yД} x)^2} + C_{BEK} \right] dx + \\ & + \int_0^L \left\{ \begin{aligned} & ((S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} y) \frac{1}{E} + \\ & + \frac{C_{PBH}}{((S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} y)^2} + C_{BEK} \end{aligned} \right\} dy; \quad (2.79) \end{aligned}$$

из уравнения (2.52)

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta L_P^\Gamma(S_{1A}) = & \int_0^L \left[ (S + W_H^{yД} x) \frac{1}{E} + \frac{C_{PH}}{(S + W_H^{yД} x)^2} + C_{BEK} \right] dx + \\ & + \int_0^R \left\{ \begin{aligned} & ((S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} y) \frac{1}{E} + \\ & + \frac{C_{PBH}}{((S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} y)^2} + C_{BEK} \end{aligned} \right\} dy + \\ & + \int_0^L \left\{ \begin{aligned} & ((S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} R + W_{BF}^{yД} y) \frac{1}{E} + \\ & + \frac{C_{PBF}}{((S + W_H^{yД} L)k + W_{BH}^{yД} R + W_{BF}^{yД} y)^2} + C_{BEK} \end{aligned} \right\} dy; \quad (2.80) \end{aligned}$$

из уравнения (2.60)

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta L_P^\Gamma(S_{1A}) = & \int_0^L \left[ (S + W_H^{yD} x) \frac{1}{E} + \frac{C_{PH}}{(S + W_H^{yD} x)^2} + C_{BEK} \right] dx + \\ & + \int_0^Z \left\{ \left( (S + W_H^{yD} L)k + W_{BF}^{yD} y \right) \frac{1}{E} + \right. \\ & \left. + \frac{C_{PBG}}{\left( (S + W_H^{yD} L)k + W_{BF}^{yD} y \right)^2} + C_{BEK} \right\} + \\ & + \int_0^L \left\{ \left( (S + W_H^{yD} L)k + W_{BF}^{yD} Z + W_{BH}^{yD} y \right) \frac{1}{E} + \right. \\ & \left. + \frac{C_{PBH}}{\left( (S + W_H^{yD} L)k + W_{BF}^{yD} Z + W_{BH}^{yD} y \right)^2} + C_{BEK} \right\} dy. \quad (2.81) \end{aligned}$$

Для написания внешних подпрограмм-функций для решения интегралов и алгебраических уравнений вводим следующие обозначения для подынтегральных функций.

В уравнении (2.78):

$$F \text{ № } 15(x) = (S_{1A} + W_H^{yD} x) \frac{1}{E} + \frac{C_{PH}}{(S_{1A} + W_H^{yD} x)^2} + C_{BEK};$$

$$\begin{aligned} F \text{ № } 16(y) = & [(S_{1A} + W_H^{yD} L)k + W_{BF}^{yD} y] \frac{1}{E} + \\ & + \frac{C_{PBG}}{[(S_{1A} + W_H^{yD} L)k + W_{BF}^{yD} y]^2} + C_{BEK}. \end{aligned}$$

В уравнении (2.79):

$$F \text{ № } 17(x) = (S + W_H^{yD} x) \frac{1}{E} + \frac{C_{PH}}{(S + W_H^{yD} x)^2} + C_{BEK};$$

$$F \text{ № 18}(y) = [(S + W_{\text{H}}^{\text{yД}} L)k + W_{\text{BH}}^{\text{yД}} y] \frac{1}{E} + \\ + \frac{C_{\text{PBH}}}{[(S + W_{\text{H}}^{\text{yД}} L)k + W_{\text{BH}}^{\text{yД}} y]^2} + C_{\text{BEK}}.$$

В уравнении (2.80)

$$F \text{ № 17}(x) = (S + W_{\text{H}}^{\text{yД}} x) \frac{1}{E} + \frac{C_{\text{PH}}}{(S + W_{\text{H}}^{\text{yД}} x)^2} + C_{\text{BEK}};$$

$$F \text{ № 18}(y) = [(S + W_{\text{H}}^{\text{yД}} L)k + W_{\text{BH}}^{\text{yД}} y] \frac{1}{E} + \\ + \frac{C_{\text{PBH}}}{[(S + W_{\text{H}}^{\text{yД}} L)k + W_{\text{BH}}^{\text{yД}} y]^2} + C_{\text{BEK}};$$

$$F \text{ № 19}(y) = [(S + W_{\text{H}}^{\text{yД}} L)k + W_{\text{BH}}^{\text{yД}} R + W_{\text{BF}}^{\text{yД}} y] \frac{1}{E} + \\ + \frac{C_{\text{PBF}}}{[(S + W_{\text{H}}^{\text{yД}} L)k + W_{\text{BH}}^{\text{yД}} R + W_{\text{BF}}^{\text{yД}} y]^2} + C_{\text{BEK}}.$$

В уравнении (2.81):

$$F \text{ № 17}(x) = (S + W_{\text{H}}^{\text{yД}} x) \frac{1}{E} + \frac{C_{\text{PH}}}{(S + W_{\text{H}}^{\text{yД}} x)^2} + C_{\text{BEK}};$$

$$F \text{ № 19}(y) = [(S + W_{\text{H}}^{\text{yД}} L)k + W_{\text{BH}}^{\text{yД}} R + W_{\text{BF}}^{\text{yД}} y] \frac{1}{E} + \\ + \frac{C_{\text{PBF}}}{[(S + W_{\text{H}}^{\text{yД}} L)k + W_{\text{BH}}^{\text{yД}} R + W_{\text{BF}}^{\text{yД}} y]^2} + C_{\text{BEK}}.$$

$$F \text{ № } 20(y) = [(S + W_{\text{H}}^{\text{yД}}L)k + W_{\text{ВГ}}^{\text{yД}}Z + W_{\text{ВН}}^{\text{yД}}y] \frac{1}{E} + \\ + \frac{C_{\text{РВН}}}{[(S + W_{\text{H}}^{\text{yД}}L)k + W_{\text{ВГ}}^{\text{yД}}Z + W_{\text{ВН}}^{\text{yД}}y]^2} + C_{\text{ВЕК}}.$$

Уравнения (2.79), (2.80), (2.81) решаем методом половинного деления. Значения, полученные при решении уравнений (2.78) и (2.79), приведены в таблице (прил. 7, третий лист) в столбце «С уточнением провеса» ниже надписи «Значения характеристик ...» в строках пунктов 1 и 2 и идентифицированы соответственно как  $DLT = \Sigma \Delta L_{\text{P}}^{\Gamma}(S_{1\text{A}})$  и  $S_{10} = S_{1\text{XX}}$ .

При моделировании процесса разгрузки и загрузки используем формулы соответственно (2.80) и (2.81). Показатели моделирования процессов разгрузки и загрузки конвейера с уточнением провисания ленты между роlikоопорами приведены в таблице (прил. 7, шестой лист).

Определение контролируемого значения суммарной деформации замкнутого контура ленты  $\Sigma \Delta L_{\text{P}}^{\Gamma}(S_{1\text{A}})_{\text{контр}}$  производим при номинальной загрузенности конвейера. Проинтегрировав уравнение (2.78) и проведя ряд соответствующих преобразований, получим формулу

$$\Sigma \Delta L_{\text{P}}^{\Gamma}(S_{1\text{A}}) = \frac{L(A S_{1\text{A}}^4 + B S_{1\text{A}}^3 + C S_{1\text{A}}^2 + D S_{1\text{A}} + G + C_{\text{ВЕ}})}{E S_{1\text{A}} (S_{1\text{A}} + W_{\text{H}}) [(S_{1\text{A}} + W_{\text{H}})k + W_{\text{ВГ}}]}, \quad (2.82)$$

где  $A = k + k^2$ ;

$$B = \frac{5k + 6k^2}{2} W_{\text{H}} + \frac{2 + 3k}{2} W_{\text{ВГ}};$$

$$C = (2k + 3k^2) W_{\text{H}}^2 + \frac{3 + 6k}{2} W_{\text{H}} W_{\text{ВГ}} + \frac{1}{2} W_{\text{ВГ}};$$

$$D = \frac{k + 2k^2}{2} W_{\text{H}}^3 + \frac{1 + 3k}{2} W_{\text{H}}^2 W_{\text{ВГ}} + \frac{1}{2} W_{\text{H}} W_{\text{ВГ}}^2 + E(k C_{\text{РН}} + \frac{C_{\text{РВГ}}}{k});$$

$$G = EC_{PH}(kW_H + W_{BH});$$

$$C_{BE} = 2EC_{BEK}S_{1A}(S_{1A} + W_H)[(S_{1A} + W_H)k + W_{BH}].$$

Контролируемым значением натяжения в контуре ленты является натяжение в точке сбегания ленты с приводного барабана при холостом ходе –  $(S_{1XX})_{\text{контр}}$ . Проинтегрировав (2.79) и проведя ряд преобразований, получим полином четвёртой степени:

$$AS^4 + BS^3 + CS^2 + DS + G = 0, \quad (2.83)$$

где  $A = k + k^2$ ;

$$B = \frac{5k + 6k^2}{2}W_H + \frac{2 + 3k}{2}W_{BH} - kE(\Sigma \Delta L_p^\Gamma / L - 2C_{BEK});$$

$$C = (2k + 3k^2)W_H^2 + \frac{3 + 6k}{2}W_H W_{BH} + \frac{1}{2}W_{BH}^2 -$$

$$- E(\Sigma L_p^\Gamma / L - 2C_{BEK})(2kW_H + W_{BH});$$

$$D = \frac{k + 2k^2}{2}W_H^3 + \frac{1 + 3k}{2}W_H^2 W_{BH} + \frac{1}{2}W_H W_{BH}^2 + E(kC_{PH} + C_{PBH}/k) -$$

$$- E(\Sigma \Delta L_p^\Gamma / L - 2C_{BEK})(kW_H^2 + W_H W_{BH});$$

$$G = E(kW_H + W_{BH})C_{PH}.$$

Решение полинома (2.83) выполняется аналогично изложенному в п. 2.2.5 решению полинома (2.77). Один из двух положительных корней является решением –  $(S_{1XX})_{\text{контр}}$ .

Значения, полученные при расчёте по формулам (2.82) и (2.83), приведены в таблице (прил. 7, третий лист) в столбце «С уточнением провеса» ниже надписи «Контрольные значения»

в строках пунктов 1К и 2К и идентифицированы как  $S_{10K} = (S_{1XX})_{\text{контр}}$  и  $DLT K = \sum \Delta L_A^\Gamma (S_{1A})_{\text{контр}}$ .

### 2.2.7. Тяговый расчёт

Тяговый расчёт ленточного конвейера выполняют в соответствии с рекомендациями отраслевого стандарта [34]. На рис. 2.6 представлена схема алгоритма определения натяжения ленты в характерных точках замкнутого контура при номинальной загруженности конвейера без учёта провеса ленты, содержащая расчёт значения тягового фактора привода. При определении учитывают условия, при которых обеспечивается нормальная работа конвейера: отсутствие пробуксовки ленты на приводном барабане в переходных режимах и значение провеса ленты в пределах допустимой нормы.

1. Исходные данные для расчёта (список вводимых переменных):  $P_p$ ;  $P_{\text{WP}}$ ;  $q_\Gamma$ ;  $q_L$ ;  $L$ ;  $\beta$ ;  $C_2$ ;  $\varpi_\Omega$ ;  $q'_p$ ;  $q''_p$ ;  $k$ ;  $E$ ;  $l'_p$ ;  $l''_p$ ;  $V$ ;  $\mu$ ;  $\alpha$ ;  $K_{\text{TC}}$ ;  $K_{\text{ND}}$ ;  $\eta_{\text{TP}}$ ;  $S_p$ ;  $S_{\text{НОМ}}$ ;  $S_{\text{НОМ.Г}}$ ;  $TK$  (блок 2).

Все исходные данные выводятся на печать с идентификаторами и численными значениями (блок 3) и располагаются в начале таблицы распечатки результатов расчёта (прил. 7, второй лист). Печать исходных данных в результатах расчёта позволяет пользователю убедиться в правильности введённых исходных данных.

Исходные данные представляют в виде столбца вертикально расположенных численных значений с форматом записи (в скобках) в соответствии со списком переменных, указанным выше. Размещают их в отдельном файле от расчётной программы (прил. 6). Процедура организации ввода данных с отдельного файла удобна при работе с вычислительными программами на персональном компьютере.

Сочетание организации ввода данных с отдельного файла и значительный список вводимых переменных позволяют рассматривать (изменять) в широком диапазоне условия при расчётах без обращения к вычислительной программе. Так, достаточно в файле изменить только значение эквивалентного коэффициента сопротивления движению  $\varpi_\Omega$ , характеризующего энергетические показатели установки, чтобы рассматривать работу установки в условиях, соответствующих новому значению  $\varpi_\Omega$ .



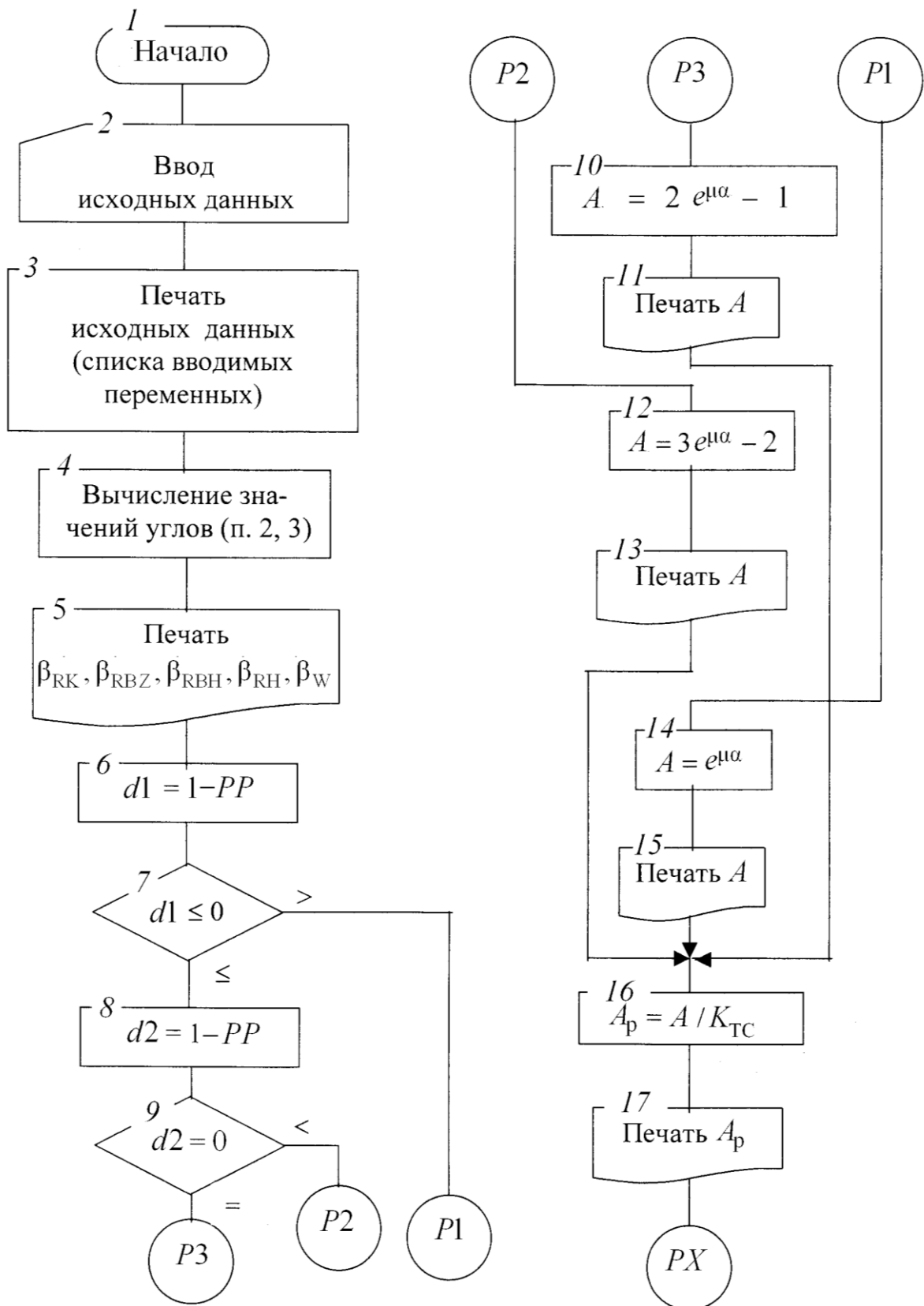


Рис. 2.6. Схема алгоритма определения натяжения в характерных точках замкнутого контура ленты уклонного (горизонтального) конвейера

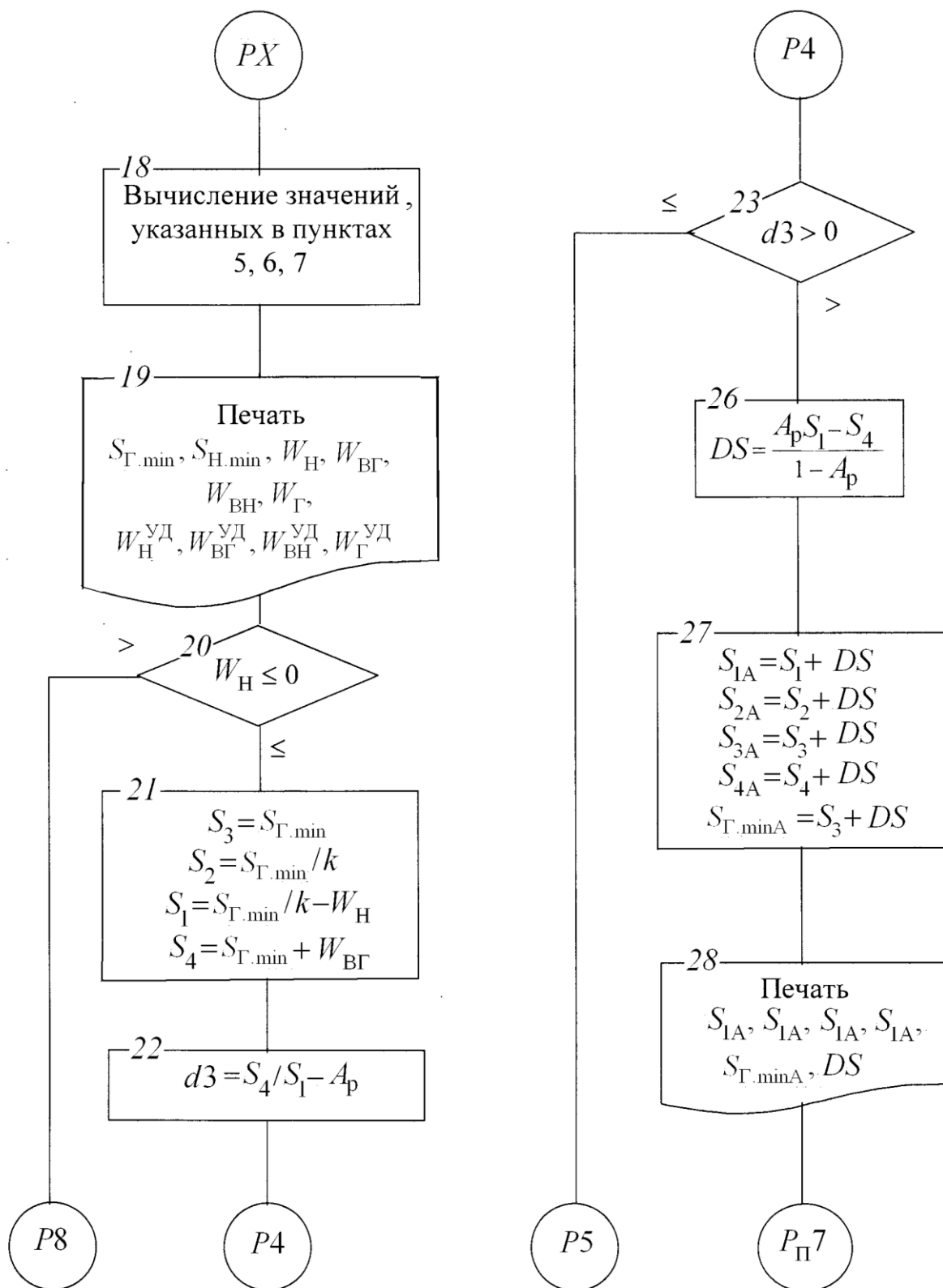


Рис. 2.6. Продолжение ...

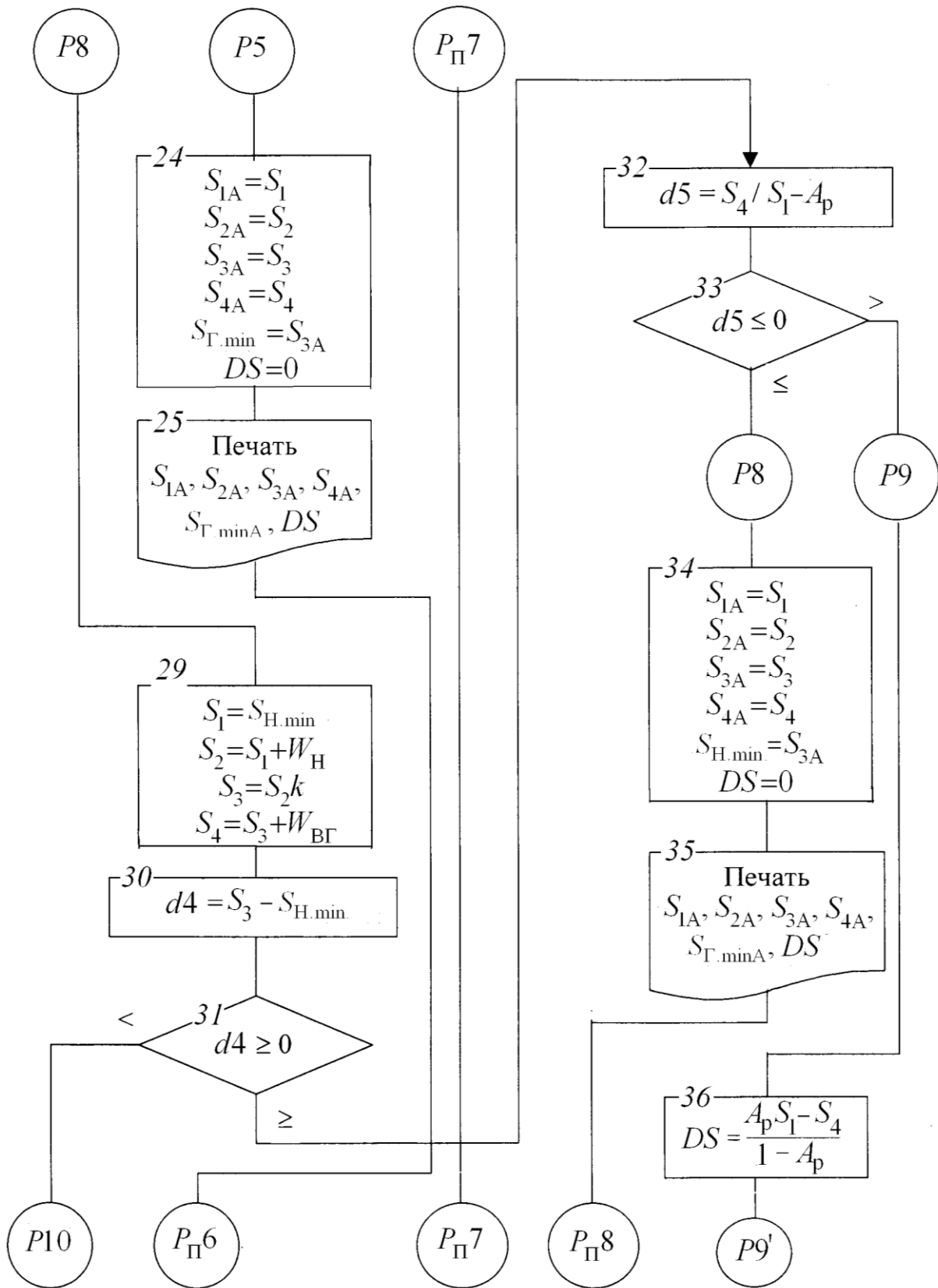


Рис. 2.6. Продолжение ...

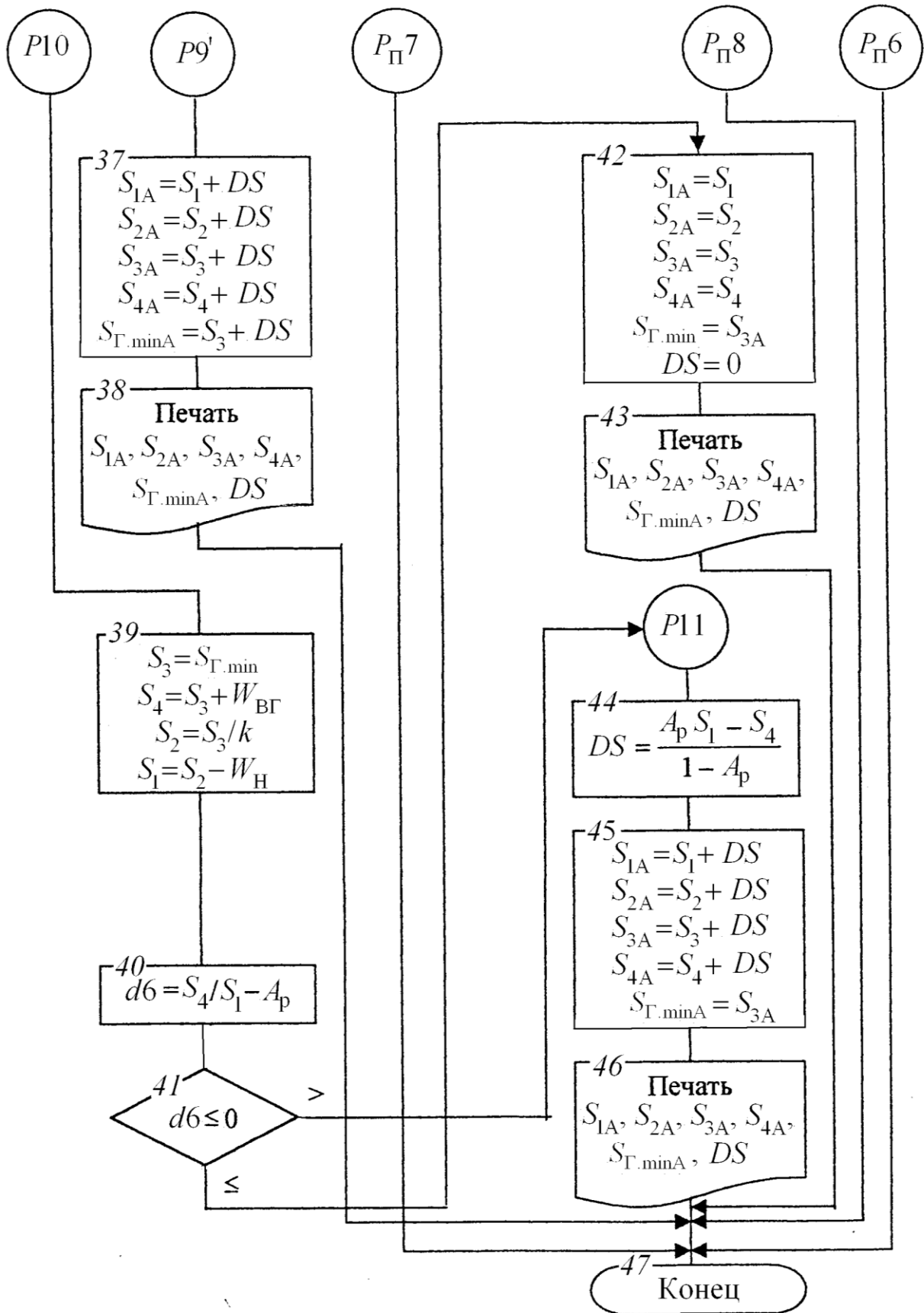


Рис. 2.6. Продолжение ...

Результаты расчёта по программе *GAMMA* выдаются также в виде отдельного от основной программы файла (прил. 7), что представляет определённые удобства для пользователя при анализе полученных результатов.

2. Характерные углы наклона (град) бремсбергового ленточного конвейера с учётом сопротивления движению ветвей конвейера:

– угол равновесия конвейера ( $|-WBZ| = WH$ )

$$\beta_{RK} = \frac{180}{\pi} \operatorname{arctg} \left[ \varpi_{\text{э}} \left( 1 + \frac{2q_{\text{Л}} + q_{\text{Р}}' + q_{\text{Р}}''}{q_{\text{Г}}} \right) \right];$$

– угол равновесия грузёной ветви ( $WBH = 0$ )

$$\beta_{RBZ} = \frac{180}{\pi} \operatorname{arctg} \left[ \varpi_{\text{э}} \left( 1 + \frac{q_{\text{Р}}'}{q_{\text{Л}} + q_{\text{Г}}} \right) \right];$$

– угол равновесия незагруженной верхней ветви ( $WBH = 0$ )

$$\beta_{RBH} = \frac{180}{\pi} \operatorname{arctg} \left[ \varpi_{\text{э}} \left( 1 + \frac{q_{\text{Р}}'}{q_{\text{Л}}} \right) \right];$$

– угол равновесия нижней ветви ( $WH = 0$ )

$$\beta_{RH} = \frac{180}{\pi} \operatorname{arctg} \left[ \varpi_{\text{э}} \left( 1 + \frac{q_{\text{Р}}''}{q_{\text{Л}}} \right) \right].$$

3. Угол равных сопротивлений ветвей ленты при номинальной загруженности конвейера ( $WBZ = WH$ )

$$\beta_{\text{W}} = \frac{180}{\pi} \operatorname{arctg} \left[ \varpi_{\text{э}} \left( 1 + \frac{q_{\text{Г}} + q_{\text{Р}}' - q_{\text{Р}}''}{2q_{\text{Л}} + q_{\text{Г}}} \right) \right].$$

Вычисление углов, указанных выше в пунктах 2 и 3, представлено блоком 4, а их печать – блоком 5. Значения углов приведено

в таблице (прил. 7, второй лист) ниже записи «Результаты расчёта значений промежуточных характеристик» в строках пунктов 1, 2, 3, 4, 5. Углы идентифицированы соответственно BERK, BERBZ, BERBH, BERN, BERW.

4. Значение тягового фактора  $A$  привода вычисляем в зависимости от числа приводных барабанов и характера связи их между собой [34].

Для однобарабанного привода тяговый фактор определяют по формуле

$$A = e^{\mu\alpha}, \quad (2.84)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения между поверхностью барабана и лентой;  $\alpha$  – угол обхвата лентой барабана, рад.

Для двухбарабанного привода с жёсткой кинематической связью тяговый фактор привода

$$A = e^{\mu\alpha_c}, \quad (2.85)$$

где  $\alpha_c$  – суммарный угол обхвата лентой барабанов, рад.

Для двухбарабанного привода с независимой связью между барабанами

$$A = e^{\mu\alpha} (K_p + 1) - K_p, \quad (2.86)$$

где  $e^{\mu\alpha}$  – тяговый фактор второго барабана, расположенного в зоне наименьшего натяжения ленты;  $K_p$  – коэффициент распределения тягового усилия между барабанами, значение которого принимается равным распределению установленной мощности между первым и вторым приводными барабанами [34].

Расчётное значение тягового фактора привода определяем по формуле

$$A_p = A / K_{TC}, \quad (2.87)$$

где  $K_{TC}$  – коэффициент запаса тяговой способности привода для обеспечения пуска и торможения конвейера без пробуксовки; для рассматриваемых горизонтальных и уклонных конвейеров следует

принимать значение  $K_{TC} = 1,15 \div 1,20$  [3], так как на настоящем этапе, как правило, ленточные конвейеры оснащены устройствами плавного пуска. Эти устройства обеспечивают плавный разгон конвейера, при котором возникающие динамические составляющие в ленте незначительны.

В исходных данных указывается признак привода  $P_p$  (идентификатор РР): РР = 0 – однобарабанный и двухбарабанный привод с жёсткой кинематической связью; РР = 1 – двухбарабанный привод с независимой связью между барабанами при распределении установленной мощности между приводными барабанами 1:1; РР = 2 – при распределении 2:1 (прил. 6, первая строка).

Вычисления, выполняемые в пункте 4, и печать их результатов представлены блоками 6–17.

Формулу (2.86) можно применять и для определения тягового фактора многобарабанных приводов конвейерных установок [37].

5. Значение минимального натяжения в контуре ленты по условию допустимого её провеса [34]:

загруженной верхней ветви

$$S_{Г. \min} = 8 g (q_{Г} + q_{Л}) l_p'; \quad (2.88)$$

незагруженной верхней ветви

$$S_{ВН. \min} = 8 g q_{Л} l_p'; \quad (2.88')$$

нижней ветви

$$S_{Н. \min} = 8 g q_{Л} l_p''. \quad (2.89)$$

6. Значение сопротивления движению (Н) ветвей ленты определяем по формулам:

нижней ветви

$$W_{Н} = L g [(q_{Л} + q_p'') \varpi_{\vartheta} \cos \beta + q_{Л} \sin \beta_2]; \quad (2.90)$$

верхней загруженной ветви

$$W_{ВГ} = L g [(q_{Г} + q_{Л} + q_p') \varpi_{\vartheta} \cos \beta + (q_{Г} + q_{Л}) \sin \beta_1]; \quad (2.91)$$

верхней ветви без груза

$$W_{\text{ВН}} = Lg[(q_{\text{Л}} + q_{\text{П}}')\varpi_{\text{Э}} \cos\beta + q_{\text{Л}} \sin\beta_1]; \quad (2.92)$$

верхней ветви от груза

$$W_{\text{Г}} = Lg q_{\text{Г}}[\varpi_{\text{Э}} \cos\beta + \sin\beta_1]. \quad (2.93)$$

7. Удельную силу сопротивления ветвей ленты определяем по формулам:

$$\left. \begin{aligned} W_{\text{Н}}^{\text{УД}} &= W_{\text{Н}} / L; & W_{\text{ВГ}}^{\text{УД}} &= W_{\text{ВГ}} / L; \\ W_{\text{ВН}}^{\text{УД}} &= W_{\text{ВН}} / L; & W_{\text{Г}}^{\text{УД}} &= W_{\text{Г}} / L. \end{aligned} \right\} \quad (2.94)$$

Вычисления, выполненные в пунктах 5, 6, 7, представлены блоком 18, а печать результатов – блоком 19.

8. Определение значений натяжения ленты в характерных точках контура из условия допустимого её провеса. Для ленточного конвейера при номинальной загруженности в диапазоне изменения угла наклона от нуля по  $18^\circ$  на рис. 2.7, б изображены недостроенные диаграммы натяжения ленты (в приращениях натяжения на выделенных участках контура ленты без местоположения оси абсцисс  $0L$  в системе координат  $0LS$ ). В системе координат  $1LS$ , в интервале от графика 5 (1–2, 3–4) натяжения ленты до графика 7 (1–2, 3–4') может располагаться множество графиков, определяемых углом наклона конвейера. Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы. Во всех случаях максимальное натяжение ленты имеет место в точке 4 набегания верхней ветви на приводной барабан. При сопротивлении  $W_{\text{Н}} < 0$  минимальное натяжение ленты в замкнутом контуре имеет место в точках 2 и 3 (это наиболее удалённые точки от приводного барабана соответственно на нижней и верхней загруженной ветви). При значении  $W_{\text{Н}} > 0$  минимальное натяжение ленты в контуре имеет место в точке 1 (это точка сбегания нижней ветви с приводного барабана).

Учитывая изложенное и то, что только в результате расчёта можно установить знак  $W_{\text{Н}}$ , дальнейший расчёт производим для двух вариантов:  $W_{\text{Н}} \leq 0$  и  $W_{\text{Н}} > 0$ .

При  $W_{\text{Н}} \leq 0$  (блок 20) значение натяжения ленты в наиболее удалённой точке 3 на грузовой ветви от приводного барабана прини-



маем равным значению  $S_{\Gamma.\min}$ . При этом значения натяжений ленты в характерных точках определяем следующим образом (блок 21):

$$\left. \begin{aligned} S_3 &= S_{\Gamma.\min}; \\ S_2 &= S_{\Gamma.\min} / k; \\ S_1 &= S_{\Gamma.\min} / k - W_H; \\ S_4 &= S_{\Gamma.\min} + W_{ВГ}. \end{aligned} \right\} \quad (2.95)$$

После действия 21 (блок 21) проверяем соотношения между значениями  $S_4$  и  $S_1$  по тяговому фактору привода по условию исключения пробуксовки ленты на приводном барабане. Работа привода без пробуксовки ленты на барабане обеспечивается при выполнении условия

$$\frac{S_4}{S_1} \leq A_p. \quad (2.96)$$

Если условие (2.96) выполняется (блоки 22, 23), то натяжение ленты в характерных точках принимаем равным значениям (блок 24):

$$\left. \begin{aligned} S_{1A} &= S_{\Gamma.\min} / k - W_H; \\ S_{2A} &= S_{\Gamma.\min} / k; \\ S_{3A} &= S_{\Gamma.\min}; \\ S_{4A} &= S_{\Gamma.\min} + W_{ВГ}; \\ S_{\Gamma.\min A} &= S_{\Gamma.\min}; \\ DS &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.97)$$

После выполнения действия 24 печатаются значения  $S_{1A}$ ,  $S_{2A}$ ,  $S_{3A}$ ,  $S_{4A}$ ,  $S_{\Gamma.\min}$ ,  $DS$  (блок 25). Если условие (2.96) (блок 23) не выполняется, то увеличиваем натяжение ленты на величину  $\Delta = DS$  в замкнутом контуре.

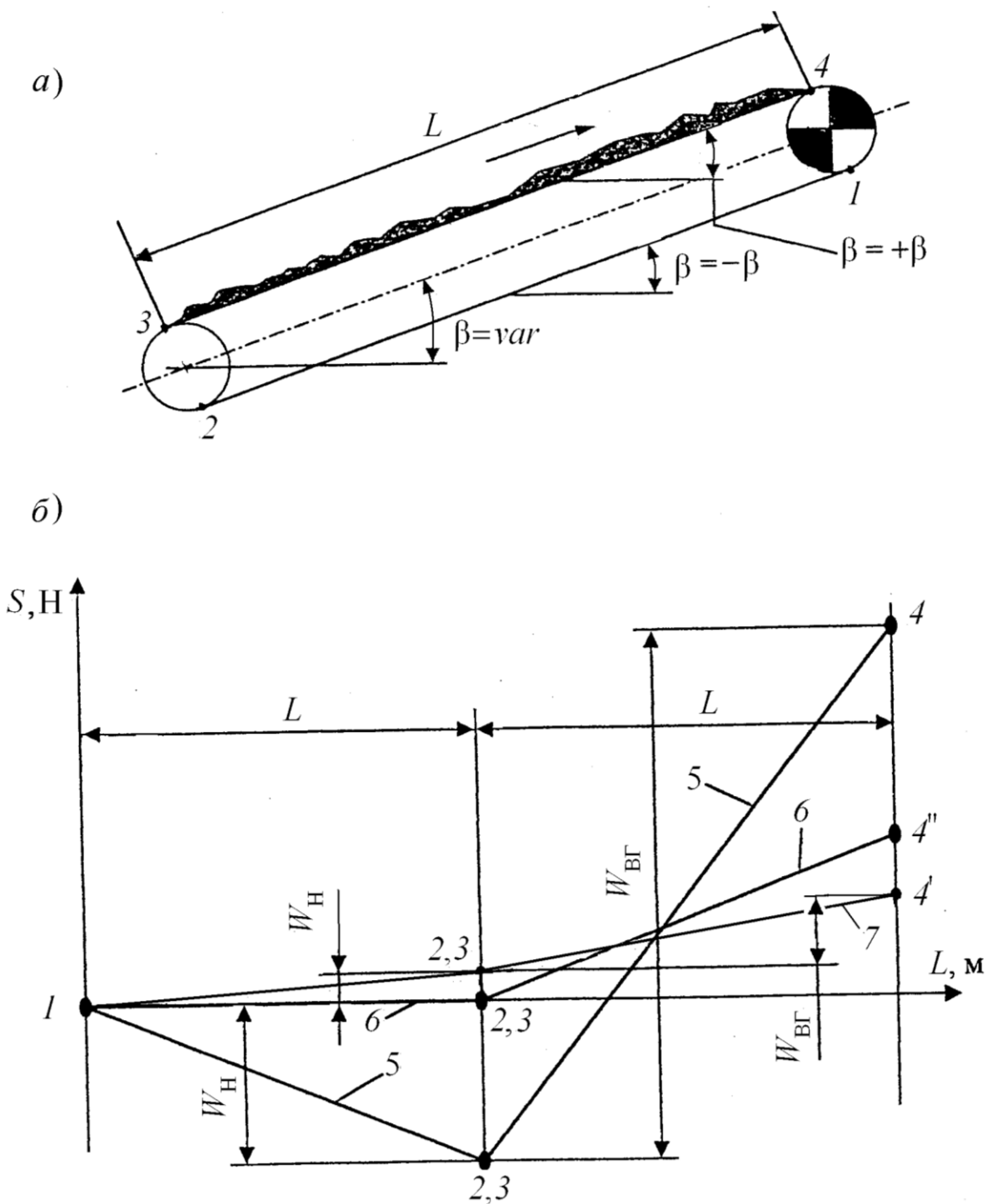


Рис. 2.7. Схемы к тяговому расчёту ленточного уклонного (горизонтального) конвейера с приводом в головной части става: *a* – расчётная схема; *б* – схема недостроенных диаграмм натяжения ленты при углах наклона конвейера: 5 – при  $\beta = 18^\circ$ ; 6 – при  $\beta = \beta_{RH}$ ; 7 – при  $\beta = 0^\circ$

При этом решаем уравнение

$$\frac{S_4 + DS}{S_1 + DS} = A_p \quad (2.98)$$

относительно значения  $DS$ . Определяем значение  $DS$  (блок 26) по формуле

$$DS = \frac{A_p S_1 - S_4}{1 - A_p}. \quad (2.99)$$

После выполнения действия 26 (блок 26) выполняют пересчёт значений натяжения ленты в характерных точках (блок 27):

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= S_{H.min}; \\ S_2 &= S_{H.min} + W_H; \\ S_3 &= (S_{H.min} + W_H)k; \\ S_4 &= (S_{H.min} + W_H)k + W_{BГ} \end{aligned} \right\} \quad (2.100)$$

и печать значений  $S_{1A}$ ,  $S_{2A}$ ,  $S_{3A}$ ,  $S_{4A}$ ,  $S_{Г.min A}$ ,  $DS$  (блок 28).

При значении  $W_H > 0$  (блок 20) натяжения ленты в точке 1 сбегания нижней ветви с приводного барабана принимают равным значению  $S_{H.min}$ . При этом значения натяжения ленты в характерных точках определяем следующим образом (блок 29):

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= S_{H.min}; \\ S_2 &= S_{H.min} + W_H; \\ S_3 &= (S_{H.min} + W_H)k; \\ S_4 &= (S_{H.min} + W_H)k + W_{BГ}. \end{aligned} \right\} \quad (2.101)$$

Полученное значение натяжения ленты в точке  $S_3$  проверяем по условию допустимого провеса ленты в наиболее удалённой точке грузовой ветви от приводного барабана по условию (блоки 30, 31)

$$S_3 \geq S_{Г.min}. \quad (2.102)$$

Если условие (2.102) выполняется (блок 31), производим проверку на работу привода без пробуксовки ленты по условию (2.96) (блок 32). При выполнении условия (2.96) (блок 33) принимаем следующие значения натяжений в характерных точках контура (блок 34):

$$\left. \begin{aligned} S_{1A} &= S_{H.min}; & S_{2A} &= S_{H.min} + W_H; \\ S_{3A} &= (S_{H.min} + W_H)k; & S_{4A} &= (S_{H.min} + W_H)k + W_{BG}; \\ S_{\Gamma.minA} &= (S_{H.min} + W_H)k; & DS &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.103)$$

Выводим на печать принятые значения (блок 35). При невыполнении условия (2.96) (блок 33) определяем значение  $DS$  по формуле (2.99) (блок 36) и в характерных точках пересчитываем значения натяжения (блок 37):

$$\left. \begin{aligned} S_{1A} &= S_{H.min} + DS; \\ S_{2A} &= S_{H.min} + W_H + DS; \\ S_{3A} &= (S_{H.min} + W_H)k + DS; \\ S_{4A} &= (S_{H.min} + W_H)k + W_{BG} + DS; \\ S_{\Gamma.minA} &= (S_{H.min} + W_H)k + DS. \end{aligned} \right\} \quad (2.104)$$

Выводим на печать значения  $S_{1A}, S_{2A}, S_{3A}, S_{4A}, S_{\Gamma.minA}, DS$  (блок 38). В случае если условие (2.102) не выполняется (блок 31), принимаем значения натяжения ленты в характерных точках по (2.95) (блок 39) и проводим проверку привода на работу без пробуксовки по условию (2.96) (блок 40). Если условие (2.96) (блок 41) удовлетворяется, то принимаем значения натяжения по (2.97) (блок 42) и выводим на печать значения  $S_{1A}, S_{2A}, S_{3A}, S_{4A}, S_{\Gamma.minA}, DS$  (блок 43). Если условие (2.96) не выполняется (блок 41), то определяем значение  $DS$  по формуле (2.99) (блок 44), выполняем пересчёт значений натяжения по (2.100) (блок 45) и выводим на печать значения  $S_{1A}, S_{2A}, S_{3A}, S_{4A}, S_{\Gamma.minA}, DS$  (блок 46).

9. Тяговое усилие и мощность двигателя привода определяем для варианта без учёта провеса ленты при номинальной нагрузке и

холостом ходе, а для второго и третьего вариантов расчёта – при холостом ходе конвейера. На рис. 2.8 изображена схема алгоритма определения указанных величин.

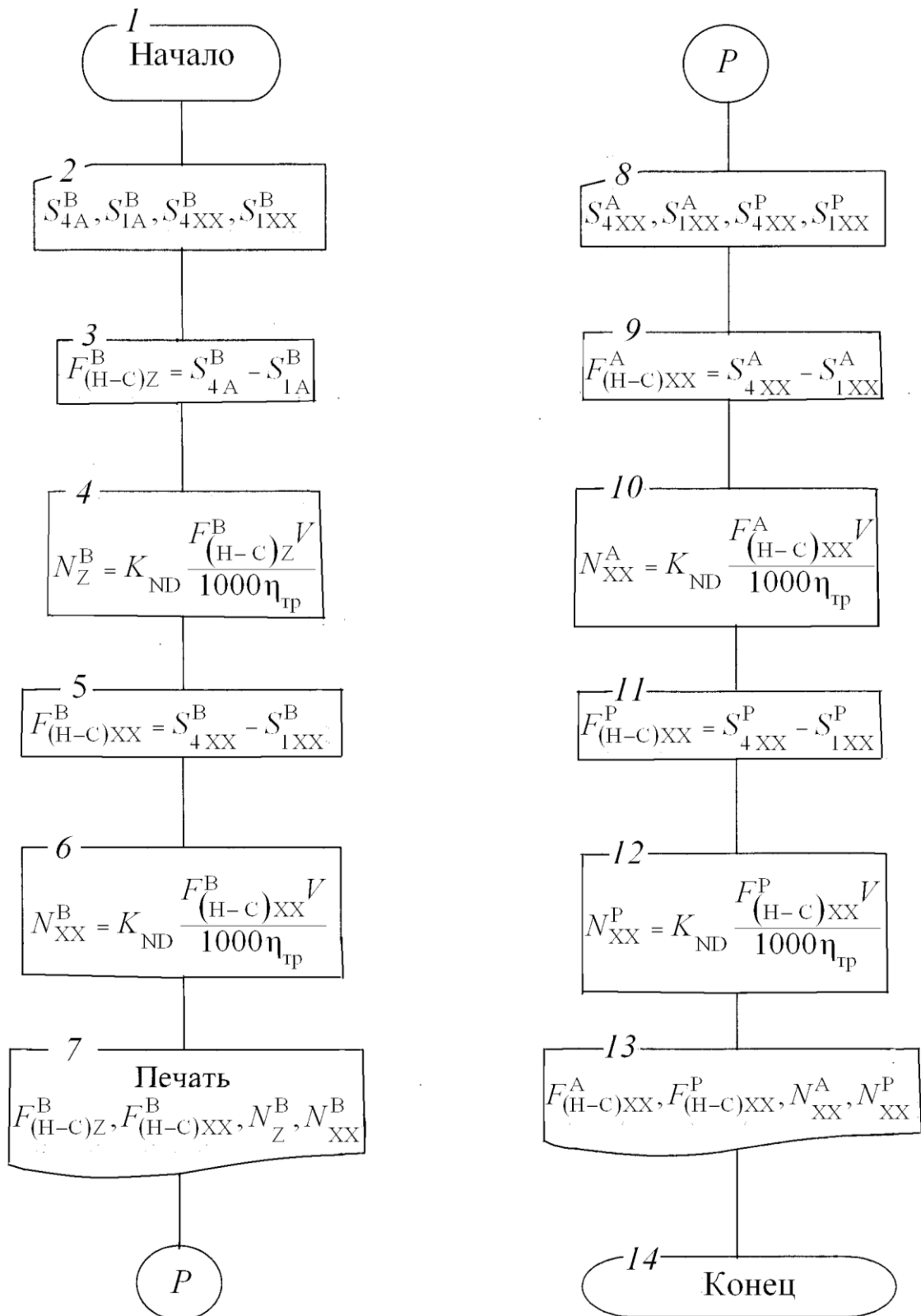


Рис. 2.8. Схема алгоритма для определения мощности двигателя привода горизонтального (уклонного) конвейера

10. Находим максимальное значение ( $S_{\max.z}^B$ ) натяжения ленты из массива  $S_{1A}^B, S_{2A}^B, S_{3A}^B, S_{4A}^B$  значений натяжения в характерных точках замкнутого контура при номинальной загруженности конвейера без учёта провеса и его порядковый номер ( $N_{\max.z}^B$ ), определяем коэффициент запаса прочности ленты  $K_{LZB}$  (рис. 2.9).

11. Аналогично изложенному материалу в пункте 10 находим максимальное значение натяжения ленты  $S_{\max.xx}^B$  из массива значений  $S_{1xx}^B, S_{2xx}^B, S_{3xx}^B, S_{4xx}^B$  для холостого хода конвейера. По максимальному значению натяжения ленты определяем коэффициент запаса прочности ленты  $K_{LB.xx}$ . Определяем порядковый номер максимального ( $N_{\max.xx}^B$ ) из массива значений натяжения ленты в характерных точках при холостом ходе.

12. В исходных данных указывается признак варианта расчёта  $P_{WP}$  (идентификатор PWP): PWP = 1 – производится расчёт трёх вариантов: без учёта провеса, с учётом провеса и с уточнением провеса; PWP = 2 – вариант без учёта провеса; PWP = 0 – рассчитываются два первых варианта (без учёта провеса и с учётом провеса) (прил. 6, вторая строка).

### **2.2.8. Методика определения действительного корня уравнения и контрольного натяжения ленты конвейера**

Одним из важнейших и ответственных этапов является отыскание действительного корня уравнения, отвечающего требованиям решаемой задачи. Корни решения уравнений (2.71), (2.77) и (2.83) отпечатаны на поле трассировки распечатки результатов расчёта. Определение действительного корня полиномов четвёртой степени (2.77) и (2.83) производим следующим образом.

1. Вычерчиваем систему координат  $OTS_1$ , в которой по оси абсцисс  $OT$  будем откладывать время  $T$  (с) процесса разгрузки конвейера, а по оси ординат  $OS_1$  – значения натяжения ленты  $S_1$  (Н) в точке сбегания её с приводного барабана (рис. 2.10), соответствующее определённой загруженности конвейера.

2. Откладываем на оси ординат  $S_1$  значение натяжения ленты  $S_{1A}$  (прил. 7, третий лист), определённое при номинальной загрузке конвейера, и обозначаем точкой 1, а по оси абсцисс  $T$  значение времени окончания процесса разгрузки  $t_p$  (с) конвейера, определённое по формуле

$$t_p = L/V, \quad (2.105)$$

где  $V$  – скорость движения ленты, м/с.

3. Строим, по данным результатов расчёта (прил. 7, четвёртый лист), на плоскости системы координат график 2 изменения натяжения ленты  $S_1$  от точки 1 до точки  $1K$  со значениями ординат  $t_p$  и  $S_{1XX}^B = PS1B = 131854$  Н. Значение  $S_{1XX}^B$  равно корню решения линейного уравнения (2.71):  $S10KB = 131854$  Н (прил. 7, первый лист). При этом правомерно точку  $1K$  считать корнем решения уравнения (2.71).

4. Принимаем значение корня  $1K$  в качестве приближённого значения для выявления действительных корней, полученных при решении уравнений (2.77) и (2.83) соответственно в рассматриваемых вариантах с учётом провеса и с уточнением провеса ленты между роликоопорами.

5. Наносим на плоскость системы координат точки  $2K \min$  и  $2K \max$ , располагая значениями  $S_{1XX.\min}^A$  и  $S_{1XX.\max}^A$ , которые представляют положительные корни полинома (2.77) в варианте решения с учётом провеса. Их значения:  $S_{1XX.\min}^A = 3ZERO = 60898$  Н, а  $S_{1XX.\max}^A = 4ZERO = 174962$  Н. Отрицательные значения корней не принимаем во внимание как лишённые физического смысла, вследствие того, что натяжение ленты не может быть отрицательным (прил. 7, первый лист).

6. Определяем на плоскости системы координат точки  $3K \min$  и  $3K \max$ , располагая ординатами  $t_p$ ,  $S_{1XX.\min}^P$ ,  $S_{1XX.\max}^P$ . Значения  $S_{1XX.\min}^P$  и  $S_{1XX.\max}^P$  представляют положительные корни полинома (2.83), в варианте решения с учётом уточнения провеса. Их значения:  $S_{1XX.\min}^P = 3ZERO = 57640$  Н, а  $S_{1XX.\max}^P = 4ZERO = 151791$  Н (прил. 7, первый лист).

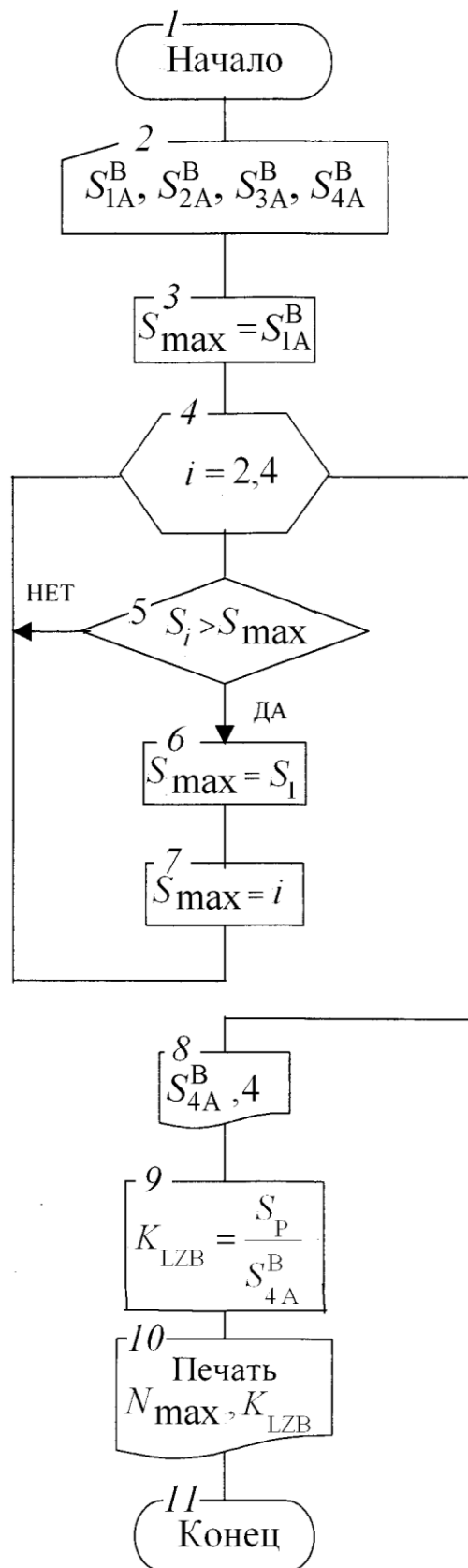


Рис. 2.9. Схема алгоритма для определения коэффициента запаса прочности ленты горизонтального (уклонного) конвейера



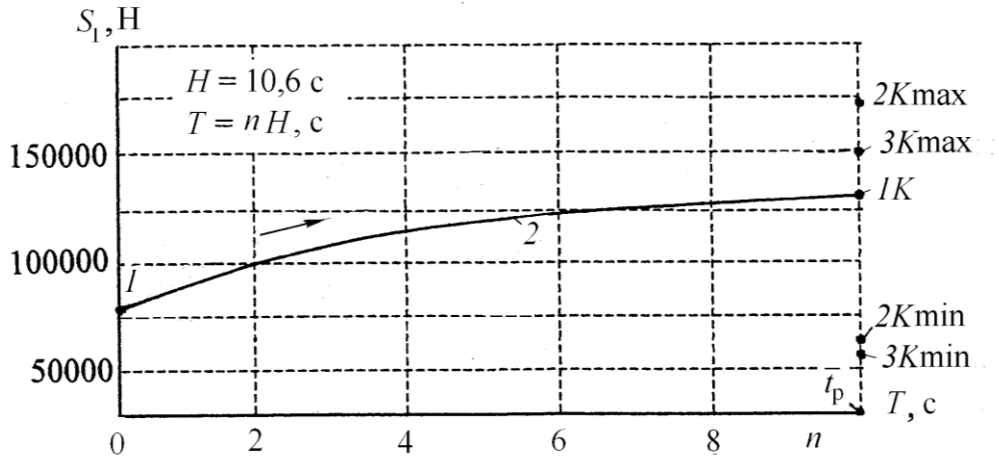


Рис. 2.10. Схема к определению действительного корня уравнения четвёртой степени в вариантах расчёта с учётом провеса и с уточнением провеса ленты между роlikоопорами:

$S_1$  – натяжение ленты в точке 1 замкнутого контура;  $T$  – текущее время;  
 $n$  – порядковый номер шага моделирования  $H$  процесса разгрузки;  
 $t_p$  – время окончания процесса разгрузки конвейера; 2 – график изменения натяжения ленты во время процесса разгрузки конвейера без учёта провеса её между роlikоопорами

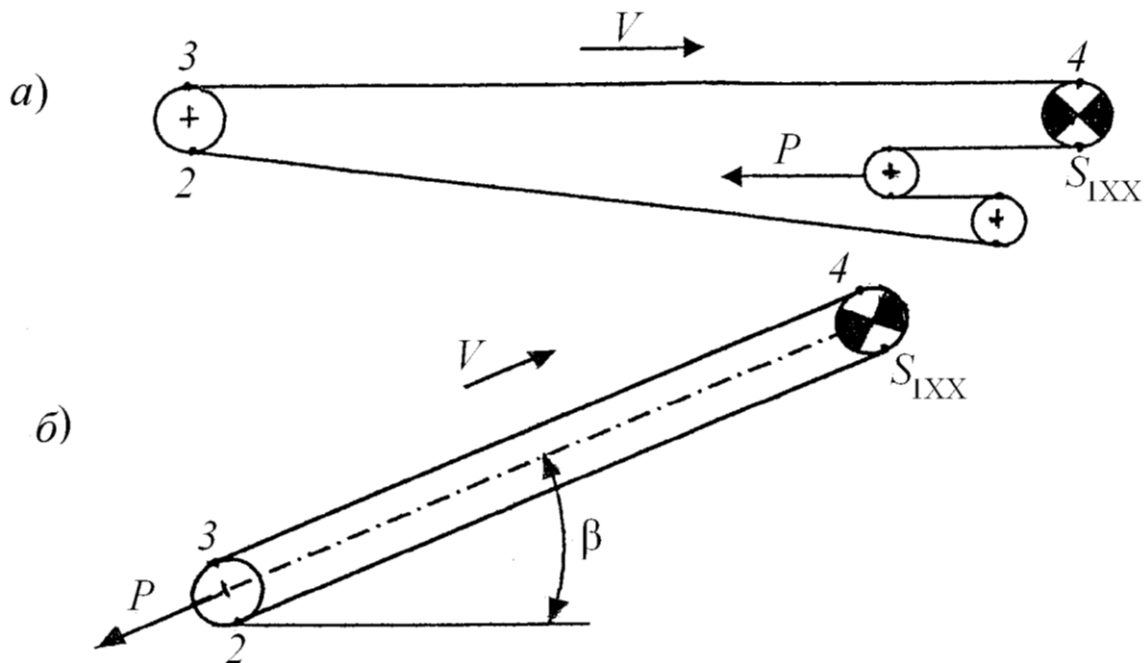


Рис. 2.11. Схемы к определению значения контрольного натяжения ленты натяжным устройством конвейера:

$a$  – горизонтального;  $б$  – уклонного, при углах, близких к предельно допустимому углу наклона конвейера

7. Принимаем значения корней, расположенных ниже корня  $IK$ , за действительные корни. Расположенные же выше корня  $IK$  значения корней не могут быть приняты за действительные корни, так как они превосходят значение корня  $IK$ , которое определено с учётом только упругих деформаций ленты и оценивается как предельно максимальное.

8. Принимаем значение контрольного натяжения ленты  $S_{1XX}$  равное меньшему значению корня из двух положительных, полученных при решении полинома четвёртой степени. При этом исключается необходимость рассмотрения процесса разгрузки конвейера с целью определения величины  $S_{1XX}$  в режиме холостого хода.

Сравнительная оценка действительных корней уравнений и значений  $S_{1XX}$ , определённых при разгрузке конвейера (в скобках), при вариантах расчёта:

без учёта провеса ленты:  $S_{10KB} = 131854$  Н ( $S_{1XX} = 131854$  Н);

с учётом провеса:  $3ZERO = 60898$  Н ( $S_{1XX} = 60900$  Н);

с уточнением провеса:  $3ZERO = 57640$  Н ( $S_{1XX} = 57643$  Н).

В связи с тем, что горные грузопотоки имеют случайный характер [3], установить расчётное значение натяжения ленты при работе загруженного конвейера не представляется возможным, так как на загруженной ленте неизвестно количество груза в каждый данный момент времени. С учётом изложенного, следует создавать натяжение ленты во время работы конвейера в режиме холостого хода [17, 34]. Величину натяжения ленты, определённую аналитически и созданную в ленте при работе конвейера в режиме холостого хода, принято называть контрольной. Контрольное натяжение ленты обеспечивает работу конвейера без пробуксовки и провес ленты в пределах допустимых нормативных значений при работе конвейера с номинальной (расчётной) нагрузкой при переходных режимах. При переходе от режима холостого хода к режиму работы конвейера с расчётной нагрузкой происходит перераспределение деформации в контуре ленты. На конвейере, имеющем жёсткое НУ, значение суммарной деформации контура ленты во время работы в переходных режимах остается неизменным, так как длина ленты в замкнутом контуре не изменяется при неподвижной каретке НУ.

В жёстких натяжных устройствах натяжная каретка со встроенным натяжным барабаном передвигается канатами с помощью

электрической лебёдки. Для контроля натяжения ленты эти устройства оснащены гидродатчиком с электроконтактным манометром или тензодатчиком. Достоинствами этих устройств являются простота и компактность конструкции, нечувствительность к загрязнению, надёжность в работе. За указанные достоинства эти устройства нашли широкое применение в шахтных конвейерах, несмотря на большое количество разработанных конструкций натяжных устройств ленточных конвейеров, в том числе и автоматизированных [3]. К недостаткам жёстких НУ следует отнести ослабление натяжения ленты в процессе работы из-за упругих и остаточных её деформаций. Это может вызвать ослабление натяжения ленты и пробуксовку её по приводному барабану. Поэтому ленте, как правило, сообщается повышенное натяжение, что приводит к сокращению срока её службы. Следовательно, определение оптимальной величины натяжения ленты является важной задачей в условиях эксплуатации конвейеров.

Величина контрольного натяжения ленты создаётся натяжной лебёдкой за счёт воздействия на натяжной барабан. Барабан может располагаться в непосредственной близости от приводной станции на нижней ветви (что характерно в условиях эксплуатации горизонтальных и уклонных конвейеров с небольшим углом наклона) или в концевой части (для уклонных конвейеров с углом наклона, близким к предельному углу наклона).

При установке натяжного устройства в конце конвейера (рис. 2.11, б), как в рассматриваемом примере, за величину контрольного натяжения ленты принимаем значение натяжения ленты в точке 3 контура  $S_{3XX.контр} = k_{нб}(S_{1XX} + W_H)$ . Натяжение в ленте  $S_{3XX.контр}$  создаётся лебёдкой НУ перемещением натяжного барабана. При этом усилии  $P$ , создаваемое лебёдкой на барабане, определяем по формуле

$$P = 2S_{3XX.контр} = 2k_{нб}(S_{1XX} + W_H), \quad (2.106)$$

где  $k_{нб} = 1,03$  – коэффициент, учитывающий сопротивление движению ленты на натяжном барабане [17].

Для рассматриваемых вариантов расчёта усилие  $P$  определяем по формуле (2.106). Подставив в формулу соответствующие значения, получим:

без учёта провеса ленты

$$P_B = 2 \cdot 1,03 \cdot (131854 - 52525) = 2 \cdot 81708,77 = 163418 \text{ Н};$$

с учётом провеса

$$P_A = 2 \cdot 1,03 \cdot (60900 - 52525) = 2 \cdot 8626,25 = 17253 \text{ Н};$$

с уточнением провеса

$$P_P = 2 \cdot 1,03 \cdot (57643 - 52525) = 2 \cdot 5271,54 = 10543 \text{ Н}.$$

Значения  $P_B$ ,  $P_A$ ,  $P_P$  необходимы для определения параметров натяжной лебёдки жёсткого натяжного устройства.

При установке натяжного устройства в непосредственной близости от приводной станции (рис. 2.11, *a*) за величину контрольного натяжения ленты следует принимать значение натяжения ленты в точке  $I$  контура  $S_{3XX.контр} = S_{1XX}$ , а создаваемое натяжной лебёдкой НУ усилие  $P$  определять по формуле

$$P = 2k_{нб} S_{1XX}. \quad (2.107)$$

Полученное значение контрольного натяжения ленты НУ без учёта провеса ленты почти на порядок больше по сравнению с вариантом расчёта с учётом провеса. Большая разница значений, естественно, вызывает сомнение в правильности применения рассмотренных вариантов расчёта.

Снижение трудоёмкости при математическом моделировании переходных режимов ленточных конвейеров на персональном компьютере с использованием разработанной вычислительной программы в значительной степени способствует поиску наиболее эффективных технических решений.

### **2.2.9. Результаты моделирования натяжения ленты в переходных режимах**

Распечатка результатов расчёта по программе *ГАММА* представлена в прил. 7 на шести листах. Начало распечатки до таблицы с исходными данными в работе принято называть «полем трассировки» (первый лист), в котором печатаются промежуточные ре-

зультаты при отладке программы и наиболее информативные значения: натяжения ленты  $S10KB$  и суммарной деформации замкнутого контура  $DLTKB$  без учёта провеса; все корни решения полинома четвёртой степени и др. В общем, на поле трассировки можно печатать любые значения, представляющие интерес для пользователя (для сравнительной оценки, для дальнейшего пути по выбору параметров, в качестве памятки и т. д.). Наличие поля трассировки даёт возможность проведения расчётов без корректировки основных таблиц распечатки. На втором и третьем листе приведены: исходные данные; результаты расчёта значений промежуточных характеристик; контрольные значения; значения характеристик без учёта провеса ленты между роlikоопорами и с учётом.

Отдельными таблицами представлены результаты моделирования процесса разгрузки и загрузки конвейера для рассматриваемых вариантов расчёта. Приведены значения натяжения ленты в характерных точках при разгрузке и загрузке конвейера для трёх вариантов: без учёта провеса ленты между роlikоопорами (четвёртый лист); с учётом провеса (пятый лист) и с уточнением провеса (шестой лист). Например, в варианте без учёта провеса ленты в соответствующей таблице приняты следующие обозначения:  $T$  – текущее время;  $DLTHHP$ ,  $DLTBZZ$ ,  $DLTBHY$  и  $SDLTBP$  – деформация ленты (м) при разгрузке конвейера соответственно нижней ветви, разгруженного участка верхней ветви неразгруженного участка верхней ветви, и суммарная деформация замкнутого контура;  $DLTHHP$ ,  $DLTBZQ$ ,  $DLTBHO$  и  $SDLTBZ$  – деформация ленты (м) при загрузке конвейера соответственно нижней ветви, загруженного и незагруженного участков верхней ветви и суммарная деформация ленты замкнутого контура;  $NPRBBP$  и  $NPRBBZ$  – мощность (кВт) двигателя привода без учёта коэффициента запаса мощности двигателя соответственно при разгрузке и загрузке конвейера;  $PS1B$ ,  $PS2B$ ,  $PS3B$ ,  $PS4B$  – натяжение ленты (Н) в характерных точках замкнутого контура при разгрузке конвейера соответственно в точках 1, 2, 3, 4;  $ZS1B$ ,  $ZS2B$ ,  $ZS3B$ ,  $ZS4B$  – натяжение ленты (Н) при загрузке конвейера соответственно в точках 1, 2, 3, 4.

Правильность процесса моделирования натяжения ленты в переходных режимах подтверждается следующими показателями. В качестве первого показателя правильности процесса принята неизменность значения суммарной деформации ленты замкнутого кон-

тура независимо от равновесного состояния. Например, при рассмотрении варианта без провеса ленты значения  $SDLTBP$  и  $SDLTBZ$  неизменны, независимо от загруженности конвейера. При разгрузке для каждого равновесного состояния, предопределяемого временем  $T$  (с), значение  $SDLTBP$  равно сумме деформаций нижней ветви ( $DLTHHP$ ), неразгруженного ( $DLTBZZ$ ) и разгруженного ( $DLTBHY$ ) участков верхней ветви. При загрузке конвейера значения  $SDLTBZ$  определяют как сумму деформаций нижней ветви ( $DLTHHP$ ), загруженного ( $DLTBZQ$ ) и неразгруженного ( $DLTBHO$ ) участков верхней ветви. Данные таблиц переходных режимов соответствуют этому показателю. Так, в варианте расчёта без учёта провеса значения суммарной деформации контура ленты  $SDLTBP = SDLTBZ = 0,233 \text{ м} = \text{const}$ . В варианте расчёта с учётом провеса значения суммарной деформации контура ленты  $SDLTBP = SDLTBZ = 0,331 \text{ м} = \text{const}$ . В варианте расчёта с учётом уточнения провеса значения суммарной деформации контура ленты  $SDLTBP = SDLTBZ = 0,280 \text{ м} = \text{const}$ .

Вторым показателем правильности хода процесса моделирования является сходимость графических зависимостей, описывающих переходные режимы, т. е. графики изменения натяжения ленты в характерных точках при разгрузке и загрузке конвейера образуют замкнутые петли. На рис. 2.12 изображены графики изменения натяжения ленты в точке  $S_1$ , построенные по данным распечатки результатов расчёта для трёх вариантов: 1. Без учёта провеса ленты (от значения натяжения ленты 76389 при номинальной загруженности до 131843 Н при окончании разгрузки и от 131843 до 76389 Н при загрузке). 2. В варианте расчёта с учётом провеса ленты (от значения натяжения ленты 76389 при номинальной загруженности до 60900 Н при окончании разгрузки и от 60900 до 76389 Н при загрузке). 3. В варианте расчёта с уточнением провеса ленты (от значения натяжения ленты 76389 при номинальной загруженности до 57643 Н при окончании разгрузки и от 57643 до 76389 Н при загрузке).

Третьим показателем правильности хода процесса моделирования является равенство значений натяжения в точке  $S_1$  контура ленты конвейера при холостом ходе, определённых при моделировании процесса изменения натяжения ленты во время разгрузки конвейера (прил. 7, четвёртый, пятый, шестой листы) и при решении полинома четвёртой степени, описывающего холостой ход конвейера (поле

трассировки). Так, при моделировании процесса изменения натяжения ленты во время разгрузки конвейера получили при окончании разгрузки в точке  $S_1$  значения натяжения ленты, равные 131854, 60900 и 57643 Н соответственно по варианту расчёта без учёта провисания ленты между роlikоопорами, с учётом провисания и с уточнением провисания. Значения натяжения в точке  $S_1$  контура ленты, определённые при решении полинома четвёртой степени, равны 60898 и 57640 Н соответственно по варианту расчёта с учётом провисания ленты и с уточнением провисания. В варианте расчёта без учёта провеса ленты уравнение движения конвейера описывается уравнением первой степени, и решение имеет один корень. В результате решения уравнения при холостом ходе получено в точке  $S_1$  значение натяжения ленты 131854 Н (поле трассировки), т. е. равное значению натяжения в точке  $S_1$  по окончании разгрузки, полученному при моделировании процесса изменения натяжения ленты во время разгрузки конвейера.

Четвёртым показателем правильности хода процесса моделирования является сходимость значений мощности на валу двигателя, определённых во время процесса разгрузки и загрузки конвейера. Так при расчёте по варианту без учёта провеса ленты значение мощности изменяется от 900,1 до 72,5 кВт при разгрузке и от 72,2 до 899,2 кВт при загрузке. В варианте с учётом провеса мощность изменяется от 900,1 до 64,7 кВт при разгрузке и от 64,7 до 899,2 кВт при загрузке. В варианте с уточнением провеса мощность изменяется от 900,1 до 64,3 кВт при разгрузке и от 64,3 до 899,2 кВт при загрузке. Приведённые значения мощности находятся в последнем столбце таблиц (прил. 7, четвёртый, пятый, шестой листы).

На основе возможности применения вычислительной программы *ГАММА* для решения конкретных производственных задач разработаны примеры практического применения интерактивных методов при проведении различных видов занятий с использованием компьютерных технологий, изложенные в прил. 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11. Рассмотрение конкретных производственных задач способствует стимулированию творческой активности студентов, повышению уровня их профессиональной подготовки и мотивации к качественному осуществлению профессиональной деятельности.

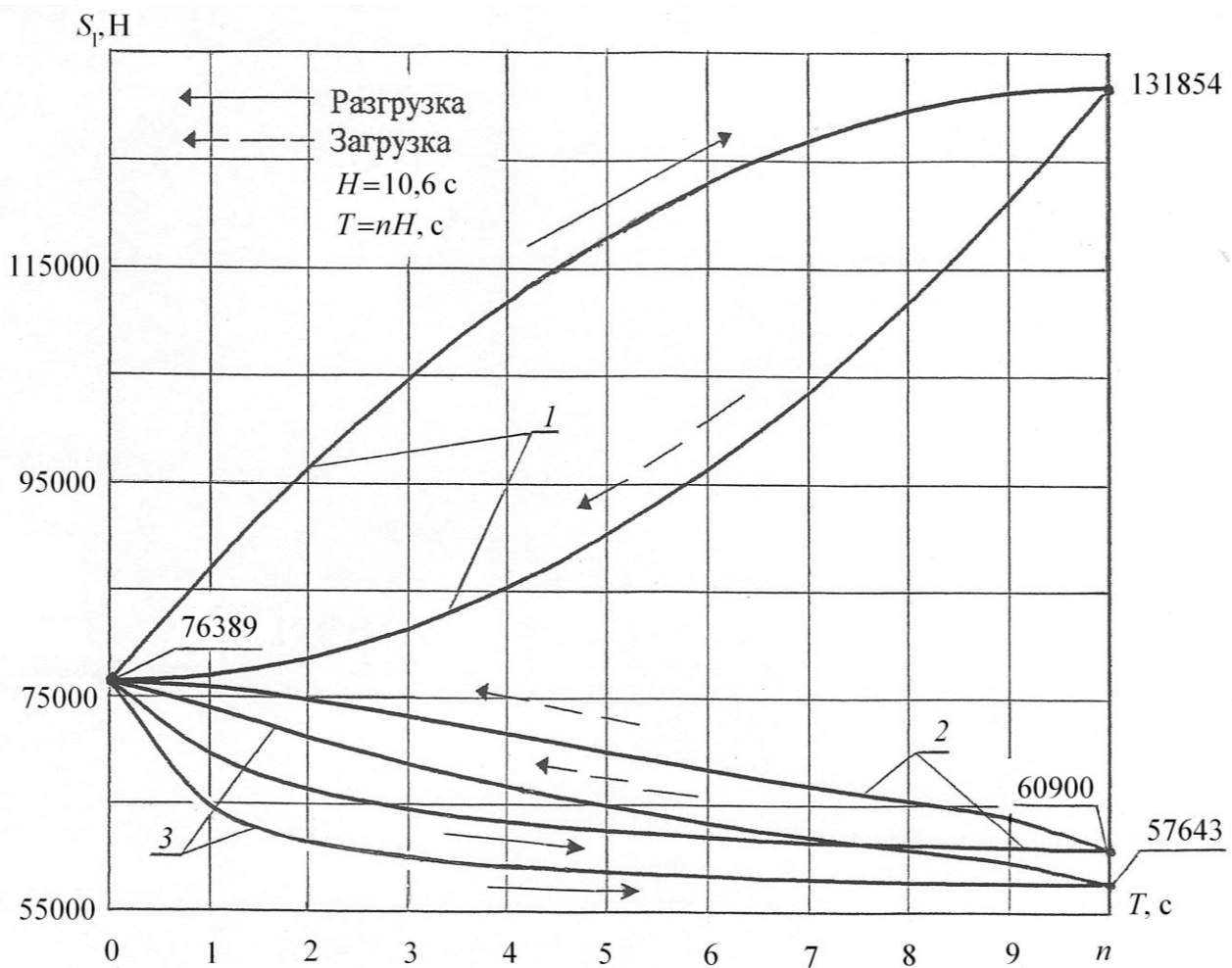


Рис. 2.12. Характер изменения натяжения ленты в точке  $S_1$  замкнутого контура во время процессов разгрузки и загрузки конвейера:  
 1 – вариант расчёта без учёта провеса ленты; 2 – с учётом провеса;  
 3 – с уточнением провеса

Определение контрольного натяжения ленты на конвейерах для транспортирования груза вниз (бремсберговых) на основе моделирования процессов изменения натяжения ленты при разгрузке и загрузке конвейера с расположением привода в нижней части става (программа *BETA*) и с расположением привода в верхней части става (программа *ALFA*), выполненных аналогично программе *GAMMA*, приведено в работе [45].



## Выводы

1. Разработана и отлажена вычислительная программа *ГАММА* для математического моделирования процесса изменения натяжения ленты в контуре при разгрузке и загрузке конвейера.

2. Наличие в программе внешних файлов (исходных данных и результатов вычислений) представляет определённые удобства для ввода переменных и анализа результатов вычислений (прил. 6 и 7).

3. При анализе результатов моделирования процесса изменения натяжения ленты уклонного конвейера 2ЛУ160, оснащённого резино-тросовой лентой и жёстким натяжным устройством, установлена большая разница в значениях контрольного натяжения ленты:

- без учёта провеса ленты между роlikоопорами равно 79329 Н;
- с учётом провеса по форме параболы – 6965 Н;
- с учётом провеса ленты по форме квадратичной параболы равно 5118 Н. Кратность значений натяжений равна 9,47 и 15,00 (прил. 7).

4. Десяти- и пятнадцатикратные значения контрольного натяжения ленты подтверждают влияние формы провеса ленты на значение контрольного натяжения ленты при оснащении уклонных конвейеров резино-тросовой лентой.

5. Определение контрольного значения натяжения ленты с учётом её провеса между роlikоопорами является трудоёмким процессом по сравнению с определением значения без учёта провеса, принятым в отраслевом стандарте ОСТ 12.14.130-79.

## Вопросы для проверки

1. Что означает символ  $E_0$  (Н/1 см ширины прокладки) в формуле жёсткости тканевой ленты конвейера  $E = BiE_0$  при рассмотрении контура ленты конвейера как замкнутого в кольцо длинного упругого стержня (без учёта провеса ленты между роlikоопорами)?

2. Что означает символ  $E'_0$  (Н/см<sup>2</sup>) в формуле жёсткости резино-тросовой ленты конвейера  $E = FE'_0$  при рассмотрении контура ленты как замкнутого в кольцо длинного упругого стержня (без учёта провеса ленты между роlikоопорами)?

3. Что означает символ  $E_{\text{НИТ}}$  (Н) в формуле агрегатной (приведённой) жёсткости резинокросовой ленты

$$E_A = \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{1}{E_{\text{НИТ}}}}$$

с учётом провеса ленты между роликкоопорами, описываемого уравнением параболы?

4. Что означает символ  $E$  (Н) в формуле

$$E_A^* = \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{q^2 \left( l_p \right)^2 \cos \beta}{24 S^3} + \frac{\left( 1 + \text{tg}^2 \beta / 2 - 1 / \cos \beta \right) \cos \beta}{S}}$$

агрегатной (приведённой) жёсткости резинокросовой ленты?

5. Понятие «шаг моделирования при рассмотрении переходных режимов ленточного конвейера» (процессы разгрузки и загрузки конвейера грузом).

6. Понятие «равновесное состояние конвейера при моделировании процессов разгрузки и загрузки конвейера грузом».

7. Понятие «жёсткое натяжное устройство ленточного конвейера».

8. Что происходит с натяжной кареткой во время процессов разгрузки и загрузки конвейера грузом с жёстким натяжным устройством?

9. Характер изменения деформации ленты в замкнутом контуре во время процессов разгрузки и загрузки конвейера, имеющего жёсткое натяжное устройство.

10. Характеристика гибкости резинокросовой ленты.

11. С какой скоростью движется граница раздела плотностей верхней (грузовой) ветви при разгрузке и загрузке конвейера?

12. Составляющие суммарной деформации замкнутого контура ленты при холостом ходе конвейера.

13. Составляющие суммарной деформации замкнутого контура ленты при работе с номинальной загруженностью конвейера.

14. Составляющие суммарной деформации замкнутого контура ленты в процессе разгрузки конвейера.

15. Составляющие суммарной деформации замкнутого контура ленты в процессе загрузки конвейера.

16. Какой метод принят для вычисления интегралов функций при моделировании переходных режимов?

17. Какой численный метод принят при решении алгебраических уравнений (уточнение корня), получаемых при математическом описании переходных режимов во время разгрузки и загрузки конвейера?

18. Каким образом можно выбрать действительный корень из четырёх корней, полученных при решении уравнения четвёртой степени (2.77)?

19. Назовите цель определения действительных корней полиномов четвёртой степени (2.77) и (2.83).

20. Физический смысл выражений:

$$\sum \Delta L_p^\Gamma (S_{1A})_{\text{контр}};$$

$$S_{1\text{xx.контр}}.$$

21. Число исходных переменных, вводимых во внешний файл, для выполнения расчёта по вычислительной программе GAMMA.

22. Физический смысл формулы

$$S_{\Gamma.\text{min}} = 8g(q_\Gamma + q_\Delta)l'_p.$$

23. Физический смысл формулы

$$\frac{S_4}{S_1} \leq A_p.$$

24. Физический смысл формулы

$$P = 2S_{3\text{xx.контр}} = 2k_{\text{нб}}(S_{1\text{xx}} + W_{\text{н}}).$$

## Заключение

Содержание учебного пособия имеет учебно-исследовательскую направленность. Цель учебного пособия способствовать процессу формирования компетентного специалиста для предприятий горного профиля выполнена. На основании проделанной работы можно сделать следующие выводы.

1. Разработана и отлажена вычислительная программа *ГАММА* для математического моделирования процесса изменения натяжения в контуре ленты при разгрузке и загрузке конвейера. Программный продукт применяется как для решения производственных задач, так и в учебном процессе при применении интерактивных методов обучения. Наличие в программе внешних файлов (исходных данных и результатов вычислений) представляет определённые удобства для ввода переменных и анализа результата вычислений.

2. Определены темы производственной направленности, на основе материала программного продукта, для проведения различных видов занятий при применении следующих интерактивных методов обучения\*: имитационно-игровое моделирование (воспроизведение в условиях обучения процесса, происходящего в реальных условиях); моделирование производственной ситуации; моделирование производственного процесса; лекция-презентация – презентация новой информации с математическим аппаратом высокого уровня. Темами методов обучения, соответственно, являются: снижение энергоёмкости транспортирования ленточным конвейером; определение оптимальной ширины ленты; определение оптимальной длины конвейера; определение значений контрольного натяжения ленты уклонного конвейера в зависимости от типа применяемой ленты и различных формах провеса ленты между роlikоопорами.

3. Приведены примеры пяти проблемных аварийных ситуаций на ленточных конвейерных установках, имевших место в различных горных выработках и в различное время, разбор которых произведён с применением кейс-метода (разбор конкретной производственной ситуации).

---

\* Требования к условиям реализации основных образовательных программ. <http://www.eurekanet.ru/ewww/info/13381.html> (дата обращения 27.11.2016).

Названия тем ситуаций: разгон ленточного бремсбергового конвейера; потеря продольной устойчивости движения ленты; перераспределение нагрузки между приводными барабанами (при разнице диаметров барабанов); перераспределение нагрузки между приводными двигателями (при разнице линейных скоростей приводных барабанов); выбор способа торможения ленточного бремсбергового конвейера с расположением привода в нижней части трассы. Предложены возможные варианты выхода из каждой рассмотренной ситуации, выбран для решения каждой проблемы лучший из них. Эффективность применения кейс-метода проявляется в виде повышенной активности реализации студентами своих знаний и умений, пробуждения желания решать проблемные вопросы с творческим началом, особенно во время практических занятий, которые проводятся в интерактивном компьютерном классе.

4. Проведены исследования влияния формы провеса ленты на величину контрольного натяжения ленты, Подтверждено влияние формы провеса ленты на значение контрольного натяжения ленты при оснащении уклонных конвейеров резиноматросовой лентой. Так для уклонного конвейера 2ЛУ160, оснащённого резиноматросовой лентой и жёстким натяжным устройством, установлена большая разница в значениях контрольного натяжения ленты. Значения контрольного натяжения ленты с учётом провеса по форме параболы и по форме квадратичной параболы превышают значение без учёта провеса ленты соответственно в десять и пятнадцать раз, которое определяется в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 12.14.130-79. В соответствии со статистикой причин возникновения пожаров на ленточных конвейерах, первой из основных является недостаточное натяжение ленты, которое приводит к пробуксовке (проскальзыванию) ленты на приводном барабане, и как следствие, к её нагреву. Поэтому вопрос о натяжении ленты является центральным вопросом как на этапе проектирования конвейерной установки для конкретных условий при определении значения контрольного натяжения ленты, так и в процессе эксплуатации при поддержании необходимого значения натяжения. Важность этого вопроса обусловлена ещё и тем, что в настоящее время используются датчики дистанционного контроля натяжения (тензодатчики), что позволяет оператору устанавливать предварительное натяжение ленты на основании данных расчёта.

5. Разработана методика выбора действительного корня полинома четвёртой степени, учитывающего форму провеса ленты между роlikоопорами, и предложено величину контрольного усилия натяжения ленты принимать равной значению действительного корня. При этом исключается необходимость рассмотрения процесса разгрузки конвейера с целью определения величины  $S_{1XX}$  в режиме холостого хода, являющегося трудоёмкой и сложной математической операцией. Уменьшение объёма вычислительных работ способствует в производственных условиях реализации требования отраслевого стандарта ОСТ 12.14.130-79 об определении контрольного значения усилия натяжения ленты для работы конвейера в режиме холостого хода.

6. Рекомендовано применять для включения двигателей конвейера, имеющего двухбарабанный и многобарабанный привод с независимой связью между барабанами и оснащённый асинхронными короткозамкнутыми двигателями с гидромуфтами, только пускатели с визуальным контролем величины мощности, потребляемой каждым двигателем из электрической сети. Это позволяет следить за текущим распределением нагрузки между барабанами и не допускать аварийных ситуаций, когда один из двигателей работает в двигательном режиме, а второй – в генераторном. Без решения этого вопроса невозможно определить текущее истинное распределение нагрузки между барабанами без инструментального замера, проведение которого связано с применением специального оборудования и возникающими при этом трудностями, связанными с выполнением требований ПБ.

7. Рекомендовано применять для пуска двигателя привода бремсберговых конвейеров, работающих в тормозном (генераторном) режиме, только пускатели со встроенной защитой от обрыва фазы. Потеря фазы в питании трёхфазной системы в результате нарушения контакта в одной из фаз, обрыва одного из проводов, сгорания одного из предохранителей во время работы конвейера приводит к уменьшению значения момента опрокидывания двигателя. Защита от обрыва фазы в пускателях, применяемых для пуска двигателей бремсбергового конвейера, не предусмотрена, так как согласно ПУЭ на двигателях напряжением выше 1000 В такая защита считается необязательной. Как правило, несоответствие между моментом опрокидывания двигателя привода при работе в тормозном

режиме конвейера и движущим моментом, создаваемым грузом на ленте, является причиной начала разгона загруженного конвейера. При достижении после начала разгона скорости ленты допустимого значения в соответствии с требованиями ПБ должна сработать защита от превышения скорости. В случае несрабатывания защиты продолжается разгон конвейера. Не исключается влияние человеческого фактора на возникновение ситуации, способствующей разгону конвейерной установки: как на этапе настройки защиты, так и загробления защиты в процессе работы; ненормативной регулировки тормозной системы обслуживающим персоналом (ошибочные или несанкционированные действия).

8. Предложено произвести разработку методики для определения контрольного значения натяжения ленты для конвейеров со сложным по прочностным характеристикам контуром ленты. Сущность проблемы заключается в том, что при работе конвейера в установившемся режиме с номинальной загруженностью натяжение ленты в характерных точках контура изменяется в зависимости от местоположения отрезка ленты с меньшей жёсткостью на длине конвейера. На горизонтальных конвейерах со сложным контуром ленты его отрицательное влияние, как правило, проявляется во время работы при максимальной загруженности в виде пробуксовки барабана относительно ленты. При работе же ленточного бремсбергового конвейера в генераторном режиме влияние проявляется в виде срыва сцепления ленты с барабаном с последующим её проскальзыванием относительно барабана, сопровождаемое падением коэффициента сцепления ленты с барабаном, что способствует развитию ускоренного неуправляемого её движения под действием составляющей веса груза на ленте. При этом скорость движения ленты становится больше линейной скорости приводного барабана («лента бежит»), происходит массовый сброс груза с ленты. Отключение конвейера средствами защиты от превышения скорости ленты в соответствии с требованиями ПБ, с последующим торможением приводного барабана, не исключает проскальзывания ленты относительно приводного барабана. Отсутствие методики не позволяет обслуживающему персоналу определять ни контрольное значение натяжения ленты, ни устанавливать его при работе конвейера в режиме холостого хода. Руководствуясь методикой, обслуживающий персонал имеет возможность определять как контрольное значение

натяжения ленты, так и устанавливать его при работе конвейера в режиме холостого хода. Применение методики позволит обеспечить работу конвейера без пробуксовки (проскальзывания) ленты относительно приводного барабана во всем диапазоне изменения загрузки, от холостого хода до номинальной загрузки.

9. Рекомендовано на специальных кафедрах при подготовке компетентных специалистов горного профиля проводить учебные занятия в интерактивной форме только в интерактивном компьютерном классе, с возможностью отображения информации экрана преподавателя на экраны компьютеров студентов и активирования управлением курсором манипулятором преподавателя. При этих возможностях класса все компьютеры класса на экране отображают информацию, которую представляет преподаватель на экране своего компьютера. С помощью курсора преподаватель может указать на экране объект. Указав объект, преподаватель, обращаясь к конкретному студенту, может предложить ему высказаться относительно указанного объекта. При этом все студенты обучаемой группы видят объект, слышат мнение конкретного студента, и каждый имеет возможность высказать свое мнение, взаимодействовать друг с другом, обмениваться информацией, вступать в коммуникативный контакт между собой. Только при такой организации процесса обучения представляется возможным эффективно осуществить: актуализацию знаний; оперативную обратную связь; интенсивность обратной связи и её объём. Без осуществления указанных компонентов формы многосторонней коммуникации при проведении занятий невозможно добиться наибольшего повышения продуктивности и эффективности применения интерактивных методов обучения, внедрение которых является одним из важнейших средств совершенствования профессиональной подготовки студентов. Положительный опыт проведения занятий в интерактивном компьютерном классе с применением методов интерактивного обучения и вычислительной программы *ГАММА* изложен в работе\*.

---

\* Подпорин Т. Ф., Барбара А. Д. Создание интерактивных компьютерных классов – залог успеха внедрения интерактивных методов обучения в подготовке компетентных специалистов горного профиля. <http://cyberleninka.ru/article/n/sozdanie-interaktivnyh-kompyuternyh-klassov-zalog-uspeha-vnedreniya-interaktivnyh-metodov-obucheniya-v-podgotovke-kompetentnyh#ixzz4bwH1uYrl> (дата обращения 07.03.2017).



# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

**Кейс № 1.** Разгон ленточного бремсбергового конвейера во время работы при номинальной (расчётной) загруженности.

Кейс-метод (метод ситуационного анализа) – техника обучения, основанная на решении конкретных проблемных производственных ситуаций. Кейс-метод предполагает наличие проблемы, которая оказывается скрытой в описании ситуации. Сущность данного метода состоит в том, что учебный материал подаётся студентам в виде проблем (кейсов), а знания приобретаются в результате активной и творческой работы при решении кейсов.

Кейс-метод является одним из методов интерактивного обучения студентов\*, применяемых при проведении практических и лабораторных занятий. Студенту (группе студентов) предлагается проанализировать конкретную производственную ситуацию, разобраться в сути проблемы, предложить возможные варианты решения и выбрать лучший из них, спрогнозировать возможные последствия принимаемого технического решения. Разбор конкретных производственных ситуаций способствует повышению профессиональных знаний, развитию мыслительных способностей студента и процессу формирования компетентного специалиста.

При работе над кейсами необходимо соблюдать следующий порядок изложения информационного материала:

1. Производственная проблемная ситуация.
2. Анализ и оценка ситуации.
3. Задачи, связанные с выходом из ситуации, и их обсуждение.
4. Предлагаемый вариант решения проблемы.

---

\* Положение о методах интерактивного обучения студентов по ФГОС 3 в техническом университете: для преподавателей ТУСУР / М. А. Косолапова, В. И. Ефанов, В. А. Кормилин, Л. А. Боков. – Томск : ТУСУР, 2012. – 87 с.

## **1. Производственная проблемная ситуация.**

Бремсберговый ленточный конвейер типа 1ЛБ100 при значении загрузки близкой к расчётному значению начинал двигаться со скоростью выше номинальной и разгонялся. Средства защиты не отключали конвейер при скорости ленты на 8 % выше номинальной, хотя и были настроены в соответствии с требованиями Правил безопасности (ПБ) [37] производить отключение конвейера при «повышении номинальной скорости ленты бремсбергового конвейера на 8 %». При этом кратность значений скоростей ленты допустимой ПБ и номинальной равна 1,080. Бремсберговый конвейер имеет однобарабанный привод без гидромuffты, расположенный в верхней части става. Футеровка барабана – рифлёная резина.

Привод оборудован двухколодочным тормозом типа ТКГ-400 с пружинным замыканием. Размыкание колодок производится электрогидравлическим толкателем типа ТЭГ-300. Натяжное устройство жёсткое, расположено в нижней части става конвейера. Натяжение ленты осуществляется натяжной лебёдкой по показаниям электроконтактного манометра с гидродатчиком. Конвейер оснащён тканевой лентой типа 2ШТК-200-2 с шестью прокладками. Средний угол наклона конвейера  $\beta = -15^\circ$ . Двигатель привода типа ВАО2-280М6 мощностью 110 кВт. Конвейер снабжён устройством контроля проскальзывания и скорости ленты УКПС.

## **2. Анализ и оценка ситуации.**

Средства защиты от превышения скорости ленты могли не отключать конвейер по следующим причинам:

- из-за неточности настройки аппаратуры защиты от превышения скорости;
- неучёта конкретных условий эксплуатации (значения критического скольжения, падения напряжения в электрической сети и др.);
- загробления защиты после её настройки (влияние человеческого фактора).

Загробление защиты от превышения скорости ленты могло быть вызвано частыми срабатываниями защиты при поступлении пиковых значений грузопотока (нагрузок) из очистного забоя на конвейер, обусловленных большим содержанием породы в горной массе во время выемки пережима в забое. При пиковых нагрузках

под действием движущего момента, создаваемого весом груза на ленте, скорость ленты увеличивается, срабатывает защита от превышения скорости ленты, технологический процесс прерывается.

При работе конвейера после загробления защиты от превышения скорости при пиковых нагрузках движущий момент, приведённый к валу двигателя привода конвейера, создаваемый грузом на ленте, может превышать значение критического тормозного момента (момента опрокидывания) двигателя привода при работе его в режиме рекуперативного торможения. При этом возможен переход двигателя на нерабочую часть механической характеристики, имеющей гиперболический характер. Гиперболический характер механической характеристики способствует разгону конвейера при работе в тормозном режиме. При этом скорость ленты возрастает до недопустимого значения.

Значение критического момента квадратично зависит от напряжения на выводах двигателя, которое, в свою очередь, зависит от колебаний напряжения сети и падения напряжения в питающей кабеле.

Значение критического момента является функцией времени. В результате деградации двигателя в процессе эксплуатации по различным причинам значение момента может уменьшаться (витковое, межфазное и корпусное замыкания в обмотке статора, разрыв цепи в одной из фаз обмоток статора, выплавление (разрыв) стержней короткозамкнутого ротора и др.).

Нормативная кратность скоростей ленты, равная 1,080, может быть больше кратности скоростей ленты, критической и номинальной, при работе конвейера в тормозном режиме. В этом случае защита от превышения скорости срабатывает в то время, когда двигатель уже работает на гиперболической части механической характеристики в режиме разгона.

Двухколодочный тормоз является «узким местом» конвейерной установки и требует ежедневного контроля и регулировки. Ненормативная регулировка тормозной системы обслуживающим персоналом (ошибочные или несанкционированные действия) могла способствовать разгону конвейерной установки после срабатывания защиты от превышения скорости.

В соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 12.14.130-79 коэффициент запаса установленной мощности двигателя привода

рекомендуется принимать равным 1,5 (для углов наклона конвейера от  $-16$  до  $-3^\circ$ ).

### **3. Задачи, связанные с выходом из ситуации, и их обсуждение:**

1. Проверить значение напряжения на выводах двигателя привода конвейера во время работы очистного забоя при максимальной нагрузке.

2. Оценить технические показатели пускателя, применяемого для включения двигателей привода конвейера, с точки зрения возможности визуального контроля за потребляемой двигателем мощностью и защиты от обрыва фазы.

3. Обобщить сведения о значении номинального скольжения современных асинхронных двигателей, применяемых на ленточных конвейерах.

4. Проверить температуру нагрева двигателя привода конвейера во время работы в двигательном и тормозном режимах.

5. Определить значение расчётной загрузженности по значению установленной мощности двигателя привода конвейера.

6. Определить значение движущего момента, создаваемого грузом на ленте при пиковых нагрузках, поступающих из лавы, и привести его к валу двигателя привода конвейера.

7. Определить критическое значение момента двигателя при работе в генераторном режиме.

8. Определить значение критического скольжения двигателя, соответствующее критическому моменту двигателя при работе в генераторном режиме.

9. Определить значение критической скорости ленты, соответствующее критическому скольжению двигателя, при работе в генераторном режиме.

10. Определить значение скорости ленты при холостом ходе конвейера, от которой производится отсчёт превышения скорости бремсбергового конвейера.

11. Определить кратность значений скоростей ленты критической к скорости ленты при холостом ходе.

В результате решения задач выявлено:

– применяемые в настоящее время на ленточных конвейерах асинхронные двигатели имеют номинальное скольжение  $S_{\text{ном}} = 0,010 \div 0,015$ ;

– критическое скольжение двигателя ВАО2-280М6 равно 0,061;

– кратность значений скоростей ленты критической к скорости ленты при холостом ходе равна 1,070;

– кратность значений скоростей ленты критической к скорости ленты при холостом ходе, равная 1,070, меньше допустимого значения кратности по ПБ, равного 1,080;

– при настройке защиты от превышения скорости ленты по коэффициенту кратности, равному 1,080, происходит отключение конвейера защитой только после перехода двигателя на нерабочую часть механической характеристики, когда двигатель уже работает на гиперболической части механической характеристики в режиме разгона;

– в пускателе, применяемом для включения двигателя привода конвейера, отсутствует возможность визуального контроля за потребляемой двигателем мощностью и защита от обрыва фазы.

#### **4. Предлагаемые варианты решения проблемы.**

1. При настройке устройства защиты от превышения скорости (УКПС) руководствоваться значением кратности критической скорости к скорости холостого хода, равной 1,070.

2. Применить для включения двигателя привода конвейера пускатель, снабжённый прибором для визуального контроля величины потребляемой мощности и защитой от обрыва фазы.

3. Исключить возможность поступления на бремсберговый конвейер грузопотока, превышающего расчётное значение.

4. Установить на конвейере более совершенный дисковый тормоз вместо двухколодочного тормоза, установленного на конвейере.

Наилучший из предлагаемых вариантов?

Наилучшее сочетание из предлагаемых вариантов?

Кейс № 1 представлен в сокращённом виде. Полное содержание материала кейса составляет 29 с.

## **Приложение 2**

**Кейс № 2.** Потеря продольной устойчивости движения лентой во время установившегося режима работы на ленточном бремсберговом конвейере (ЛБК).

## 1. Производственная проблемная ситуация.

Во время работы ЛБК типа 1ЛБ100 происходит потеря устойчивости движения ленты – «лента бежит», то есть опережает линейную скорость приводного барабана. Имеют место частые завалы хвостовой части конвейера, принимающего грузопоток с конвейера 1ЛБ100. Загрузка конвейера осуществляется через промежуточный загрузочный пункт (грузопоток поступает из комплексно-механизированного очистного забоя – лавы 543) и верхнюю концевую часть конвейера (грузопоток поступал из подготовительного забоя с преобладанием содержания породы). Нагрузка на конвейере достигает максимальных значений во время подачи горной массы на концевую часть конвейера с помощью скребкового конвейера типа СР-70, на котором масса аккумулируется при поступлении из подготовительного забоя. Конвейер имеет однобарабанный привод без гидромукты, расположенный в верхней части става. Футеровка барабана – рифлёная резина. Тормозная система выполнена на базе колодочных тормозов с постоянным тормозным моментом. Конвейер имеет сложный по прочностным характеристикам контур из тканевой ленты (содержит ленту с шестью прокладками и отрезок ленты длиной 200 м, имеющий четыре прокладки, в дальнейшем изложении материала – *отрезок*). Натяжное устройство жёсткое, расположено в нижней части става конвейера. Натяжение ленты осуществлялось натяжной лебёдкой по показаниям электроконтактного манометра с гидродатчиком. Длина конвейера  $L = 302$  м. Средний угол наклона конвейера  $\beta = -15^\circ$ . Двигатель привода конвейера типа ВАО2-280М6 мощностью 110 кВт.

В результате обследования были выявлены следующие условия эксплуатации. Горная выработка обводнена и с неходовой части завалена крупными кусками угля, сброшенными с ленты во время неуправляемого её движения. В соответствии с проведёнными расчётами установлено:

- использование в контуре отрезков лент как с шестью прокладками, так и четырьмя прокладками правомерно по прочностным характеристикам;
- применение двигателя мощностью 110 кВт на приводе конвейера также правомерно.

## 2. Анализ и оценка ситуации.

ЛБК в зависимости от загруженности может работать как в двигательном режиме, так и в тормозном (генераторном режиме).

При работе в генераторном режиме имеют место случаи потери продольной устойчивости движения лентой во время установившегося режима работы, проявляющиеся в виде срыва сцепления ленты с барабаном с последующим её проскальзыванием относительно барабана. Проскальзывание сопровождается падением коэффициента сцепления ленты с барабаном, что способствует развитию ускоренного неуправляемого её движения под действием составляющей веса груза на ленте. При этом скорость движения ленты становится больше линейной скорости приводного барабана («лента бежит») и происходит массовый сброс груза с ленты. Отключение конвейера средствами защиты от превышения скорости ленты в соответствии с требованиями ПБ [46] с последующим торможением приводного барабана не исключает проскальзывания ленты относительно заторможенного барабана.

Возможно, лента «бежит» при недостаточном её сцеплении с приводным барабаном, обусловленном недостаточным её натяжением натяжным устройством.

Возможно, лента «бежит» из-за наличия *отрезка* в контуре, что влияет на перераспределение усилий в ветвях ленты на приводе.

Возможно, лента «бежит» за счёт увеличивающегося значения продольной упругой деформации *отрезка* при нахождении его в зоне больших натяжений в контуре.

Возможно, лента «бежит» при загруженности конвейера, превышающей расчётное значение.

При жёстком натяжном устройстве длина контура ленты остаётся постоянной (неизменной) при переходных режимах от холостого хода к максимальной загруженности. При этом остаётся неизменной сумма продольных деформаций ленты замкнутого контура как сложного по прочностным характеристикам, так и содержащего только отрезки ленты одинаковой прочности.

Отраслевой стандарт [34] рекомендует значение контрольного натяжения устанавливать при холостом ходе, так как при случайном характере горных грузопотоков количество груза на ленте неизвестно.

### 3. Задачи, связанные с выходом из ситуации, и их обсуждение:

1. Определить значение расчётной загруженности конвейера.  
2. Выявить значение загруженности конвейера, при котором происходит потеря продольной устойчивости движения лентой во время установившегося режима работы конвейера.

3. Выявить влияние местоположения *отрезка* на длине конвейера на потерю продольной устойчивости движения лентой во время работы конвейера с расчётной загруженностью в режиме установившегося движения.

4. Выполнить тяговый расчёт конвейера с учётом основных положений Отраслевого стандарта [34] при расчётной загруженности конвейера для четырёх характерных местоположений *отрезка* на его длине. За исходное принять местоположение *отрезка* на грузовой ветви, при котором начало отрезка совпадает с точкой сбегания ленты с приводного барабана.

5. Определить для каждого местоположения *отрезка* по ходу движения ленты при установившемся режиме движения конвейера значение текущего показателя устойчивости движения ленты  $S_{сб}/S_{нб}$  ( $S_{сб}$  и  $S_{нб}$  – усилие натяжения ленты соответственно в точке сбегания ленты с приводного барабана и в точке набегания на приводной барабан).

6. Выявить из рассмотренных четырёх местоположений *отрезка* на длине конвейера наиболее опасное с точки зрения потери продольной устойчивости движения ленты, располагая четырьмя значениями  $S_{сб}/S_{нб}$ .

7. Принять за первоначальное местоположение *отрезка* для дальнейших исследований выявленное наиболее опасное местоположение и определить необходимое значение натяжения ленты на концевом барабане, при котором исключается потеря устойчивости движения ленты (проскальзывание ленты по приводному барабану).

8. Определить сумму продольных деформаций ленты по заданной расчётной загруженности конвейера для первоначального местоположения *отрезка*.

9. Определить значение усилия натяжения ленты на концевом барабане для режима холостого хода конвейера по полученному значению суммы продольных деформаций и принять его за контрольное значение.



10. Разработать методику установления значения усилия контрольного натяжения ленты натяжным устройством во время движения *отрезка* по наиболее опасному местоположению.

11. Установить значение усилия контрольного натяжения ленты натяжной лебёдкой по показаниям электроконтактного манометра с гидродатчиком.

12. Определить значение  $S_{сб}/S_{нб}$  для каждого местоположения *отрезка* по ходу движения ленты в режиме установившегося движения при расчётной загруженности конвейера и проанализировать результаты расчёта.

10. Разработать мероприятия по ограничению поступления грузопотока на конвейер до значения, при котором загруженность конвейера не превышает расчётного значения.

В результате решения задач выявлено:

– при постоянной загруженности конвейера в режиме установившегося движения усилие натяжения по контуру ленты изменяется и зависит от местоположения *отрезка* на длине конвейера;

– происходит потеря устойчивости движения ленты только при перемещении *отрезка* ленты в зону больших натяжений порожней ветви при загруженности свыше 90 %;

– наиболее опасным местоположением *отрезка* с точки зрения потери устойчивости движения ленты является местоположение в зоне больших натяжений порожней ветви с началом в точке набегающей ленты на приводной барабан.

#### **4. Предлагаемые варианты решения проблемы.**

1. Заменить в контуре ленты конвейера *отрезок* ленты отрезком ленты с шестью прокладками.

2. Оснастить конвейер резинометаллической лентой соответствующей прочности.

3. Сохранить на конвейере сложный по прочностным характеристикам контур из тканевой ленты и произвести установку значения контрольного натяжения ленты натяжным устройством в соответствии с разработанной методикой.

4. На конвейере заменить жёсткое натяжное устройство на автоматическое натяжное устройство, которое обеспечивает расчётное значение отношения натяжений в набегающей и сбегающей ветвях на приводном барабане независимо от значения загруженности конвейера.

Наилучший из предлагаемых вариантов?

Наилучшее сочетание из предлагаемых вариантов?

Кейс № 2 представлен в сокращённом виде. Полное содержание материала кейса составляет 25 с.

### Приложение 3

**Кейс № 3.** Перераспределение нагрузки между приводными барабанами на конвейере типа 2ЛУ100У01 уклона 5/7.

#### **1. Производственная проблемная ситуация.**

Во время работы уклонного конвейера типа 2ЛУ100У01 происходит выход из строя то двигателя, то турбомуфты, то редуктора.

Конвейер имеет двухбарабанный привод с независимой связью между барабанами. На обоих приводных блоках установлены электродвигатели типа ЭДК-5-5 с гидромуфтами. Длина конвейера 430 м, угол наклона 13°, оснащён резинокросовой лентой типа 2РТЛЮ-1500. Приводные барабаны имеют резиновую футеровку с рифами высотой 8 мм. Натяжное устройство жёсткое, расположено в нижней части става конвейера. Натяжение ленты осуществлялось натяжной лебёдкой по показаниям электроконтактного манометра с гидродатчиком.

#### **2. Анализ и оценка ситуации.**

Двигатель каждого приводного блока конвейера должен работать только в двигательном режиме, независимо от загруженности конвейера.

Наличие гидромуфт на приводных блоках, при их исправном состоянии и нормативном наполнении рабочей жидкостью, способствует в той или иной степени распределению нагрузки между приводными барабанами.

Выход из строя то двигателя, то гидромуфты, то редуктора происходит только на одном и том же приводном блоке.

Возможно, сказывается на выходе из строя то двигателя, то гидромуфты, то редуктора неравномерное распределение нагрузки между приводными блоками, обусловленное различного рода факторами, возникшими при монтаже конвейера или в процессе его эксплуатации.

Возможно, выходят из строя то двигатель, то гидромуфта, то редуктор на том приводном блоке, на который приходится большая нагрузка, возникающая в результате перераспределения нагрузки

между барабанами, по сравнению с расчётным значением распределения нагрузки.

При пуске конвейера имели место случаи невключения пускателя одного из приводных блоков (отказ электрической части). При этом тяговое усилие приходилось на один барабан, и он в случаях небольшой загруженности конвейера обеспечивал движение ленты при пуске без пробуксовки, а при загруженности, близкой к номинальной, пробуксовывал до тех пор, пока оператор пункта погрузки не встряхивал корпус пускателя ударом рельсовой накладки (от встряхивания пускатель включался).

Распределение нагрузки между барабанами является функцией времени, так как предопределяется постоянно происходящим износом футеровки приводных барабанов и рядом других факторов, проявляющихся в процессе эксплуатации. На износ футеровки приводных барабанов влияют в той или другой степени следующие причины: упругое скольжение ленты на барабане на дуге скольжения, связанное с процессом передачи тягового усилия от барабана ленте [3, 13]; пробуксовка ленты на приводном барабане (или барабана относительно ленты), обусловленная различного рода факторами: перегрузки, возникающие при пуске загруженного конвейера; снижение усилия натяжения ленты из-за её вытяжки в процессе работы; уменьшение значения коэффициента трения между барабаном и лентой под воздействием окружающей среды и т. д.

В общем же случае на перераспределение нагрузки между двигателями влияют такие возмущающие факторы, как: изменение радиусов приводных барабанов (износ, загрязнение, неконцентрическая посадка барабанов на вал или некруглость их формы); различная толщина верхней и нижней обкладок ленты; изменение упругости ленты, изменение общего тягового усилия [13].

В Правилах технической эксплуатации ленточных конвейеров ПТЭ [47] и Руководстве [14] изложены требования, в той или другой степени касающиеся распределения нагрузки между приводными барабанами. В ПТЭ [47, п. 4.3] рекомендуется осуществлять контроль распределения нагрузки между приводными барабанами с помощью амперметра «Для уменьшения износа ленты...». В Руководстве [14, п. 5.13, 5.14] требуется «... не допускать работу конвейеров с износом футеровки до обнажения металлической поверх-

ности барабанов» и систематически проверять уровень заполнения гидромурфты рабочей жидкостью.

В ПТЭ [47] и Руководстве [14] отсутствуют требования по допустимой величине разницы в износах футеровок барабанов.

### **3. Задачи, связанные с выходом из ситуации, и их обсуждение:**

1. Произвести инструментальные замеры мощностей, потребляемых из электрической сети двигателями приводных блоков привода конвейера.

2. Определить диаметры барабанов приводных блоков привода.

3. Определить значение разницы диаметров барабанов приводных блоков.

4. Определить передаточные числа редукторов приводных блоков привода конвейера.

5. Оценить технические возможности пускателей, применяемых для включения двигателей конвейера, с точки зрения возможности визуального контроля значения мощности, потребляемой каждым двигателем из электрической сети при работе конвейера.

6. Проверить в схеме автоматизации наличие блокировки, исключающей возможность работы одного приводного блока без включения другого.

В результате решения задач выявлено:

– в приводных блоках привода разница диаметров барабанов составляет 16 мм;

– на одном приводном блоке двигатель работает в двигательном режиме, а на другом – в генераторном;

– применяемые пускатели для включения двигателей конвейера не позволяют визуально оценить значения мощности, потребляемой каждым двигателем из электрической сети при работе конвейера, а следовательно, и установить действительное распределение нагрузки между приводными барабанами во время работы конвейера;

– в схеме автоматизации отсутствовала блокировка, исключающую возможность работы одного приводного блока привода конвейера без включения другого.

### **4. Предлагаемые варианты решения проблемы.**

1. Использовать для включения каждого двигателя привода конвейера отдельный пускатель, снабжённый встроенным датчиком мощности и прибором для визуального контроля величины потребляемой мощности и её направлением (потребление из сети, отдача

в сеть). При этом создаются благоприятные условия для возможности текущего контроля распределения нагрузки между приводными блоками привода и своевременного выявления отклонений в распределении нагрузки.

2. Заменить приводной барабан с изношенной футеровкой, так как разница в диаметрах достигла значения, при которой один двигатель работает в двигательном режиме, а другой в генераторном.

3. Установить в схеме автоматизации блокировку, исключающую возможность работы одного приводного блока привода конвейера без включения другого.

Наилучший из предлагаемых вариантов?

Наилучшее сочетание из предлагаемых вариантов?

## **Приложение 4**

**Кейс № 4.** Перераспределение нагрузки между приводными двигателями на конвейере типа 2ЛУ100У01 уклона 11/3.

### **1. Производственная проблемная ситуация.**

Перегрелся двигатель на одном из приводных блоков на конвейере типа 2ЛУ100У01 с двухбарабанным приводом с независимой связью между барабанами. По этой причине один приводной блок был отключён и конвейер работал с одним блоком. С развитием горных работ возникла необходимость работы конвейера с двумя приводными блоками. Причина перегрева одного из двигателей неясна. На обоих приводных блоках установлены электродвигатели типа ЭДК-5-5 с гидромуфтами. Длина конвейера 450 м, угол наклона 13°, оснащён резинометаллической лентой типа 2РТЛО-1500.

### **2. Анализ и оценка ситуации.**

Возможен перегрев двигателя в результате потери фазы в питании трёхфазной системы: из-за нарушения контакта в одной из фаз; обрыва одного из проводов; сгорания одного из предохранителей во время работы конвейера.

Возможен перегрев двигателя при снижении напряжения на выводах двигателя.

Возможен перегрев двигателя в результате деградации двигателя. Во время эксплуатации у двигателя могут возникать отказы различного характера: обрыв цепи в фазе в одной из обмоток статора; выплавление (разрыв) стержней короткозамкнутого ротора; затир ро-

тора о статор; разрушение и заклинивание подшипника; витковое, межфазное и корпусное замыкания в обмотке статора и др. [48].

Возможен перегрев двигателя в результате межвиткового, междуфазного и корпусного замыканий обмотки статора. Наличие замкнутых витков в одной из фаз статора приводит к увеличению тока в этой фазе.

Возможен перегрев двигателя в результате его перегрузки, возникающей за счёт перераспределения нагрузки между барабанами приводных блоков из-за разницы в радиусах барабанов.

Возможен перегрев двигателя в результате его перегрузки, возникающей за счёт перераспределения нагрузки между барабанами приводных блоков из-за разницы передаточных чисел редукторов.

Нагрузка двигателя определяется по его механической характеристике: по моменту на валу двигателя и угловой скорости ротора.

Эффективным методом при анализе распределения нагрузки между приводными барабанами в двухбарабанном приводе с независимой связью между барабанами является метод совмещение тяговых характеристик приводных блоков привода конвейера в одной системе координат.

### **3. Задачи, связанные с выходом из ситуации, и их обсуждение:**

1. Определить значения диаметров приводных барабанов.
2. Определить значения передаточных чисел редукторов приводных блоков конвейера.
3. Построить тяговые характеристики приводных блоков привода в одной системе координат и теоретически определить распределение нагрузки при определённых значениях передаточных чисел редукторов приводных блоков.
4. Проверить значение напряжения на выводах двигателей приводных блоков привода конвейера.
5. Проверить плотность контактов в фазах и устранить возможные обрывы проводов в трёхфазной системе.
6. Проверить двигатель с целью обнаружения: обрыва цепи в одной из фаз обмоток статора; выплавления (разрыв) стержней короткозамкнутого ротора; затира ротора о статор; разрушения и заклинивания подшипника; виткового, межфазного и корпусного замыкания в обмотке статора и др.

7. Произвести инструментальный замер распределения нагрузки между двигателями приводных блоков привода конвейера.

8. Оценить технические возможности пускателей, применяемых для включения двигателей привода конвейера с точки зрения возможности визуального контроля величины потребляемой двигателем мощности и её направление (потребление из сети, отдача в сеть).

В результате решения задач выявлено:

– на одном приводном блока в коническо-цилиндрическом редукторе в быстроходной конической ступени вал-шестерня имеет 22 зубца, а на другом блоке вал-шестерня имеет 23 зубца;

– на одном приводном блоке двигатель работает в двигательном режиме, а на другом – в генераторном;

– применяемые пускатели для включения двигателей привода конвейера не позволяют визуально оценивать действительное распределение нагрузки между приводными барабанами во время работы конвейера.

#### **4. Предлагаемый вариант решения проблемы.**

1. Установить в редукторах конические валы-шестерни с одинаковым числом зубцов на обоих приводных блоках привода конвейера.

2. Применить для включения каждого двигателя привода конвейера отдельный пускатель, снабжённый прибором для визуального контроля величины потребляемой двигателем мощности и её направление.

Наилучший из предлагаемых вариантов?

Наилучшее сочетание из предлагаемых вариантов?

## **Приложение 5**

**Кейс № 5.** Выбор способа торможения ленточного бремсбергового конвейера с вогнутым продольным профилем.

Для работы над решением проблемы были даны в электронном виде материалы: продольный профиль конвейера; техническая характеристика конвейера; материал по теории волновых процессов, происходящих в ленте во время переходных режимов.

### **1. Производственная проблемная ситуация.**

Ленточный конвейер типа ЗЛТА-1200 установлен на всю длину конвейерного штрека лавы 9В пласта Владимировского 2. Кон-

вейер имеет прогиб в вертикальной плоскости. Продольный профиль конвейера изображён на рисунке ниже. Во время торможения конвейера на наклонной его части по направлению движения грузопотока вниз лента собирается в складки (правее точки 7), вследствие чего возникает сброс угля с ленты и заштыбовка конвейера. Первоначальная длина конвейера составляла 1950 м при отрицательном перепаде высот между концевыми барабанами равном 52 м. Привод и тормозное устройство расположены в нижней части трассы. Привод имеет три приводных блока. На каждом блоке установлен двигатель типа ЗАРВ-315М4 мощностью 315 кВт и дисковый тормоз. Применяется система частотного регулирования электропривода конвейера. Контроль усилия натяжения ленты, создаваемого натяжной лебёдкой, осуществляется посредством тензометрического датчика, встроенного в полиспадную систему натяжного устройства, расположенного у привода. Контролирует и создаёт усилие натяжения ленты натяжной лебёдкой оператор, находящийся в диспетчерской на поверхности шахты. Конвейер оснащён пакетным телескопом с телескопичностью 200 м и конвейерной лентой шириной 1200 мм (условное обозначение ленты 1.2Ш(ЕР-400) с четырьмя прокладками). Скорость движения ленты равна 3,15 м/с.

В результате раскрытия пласта со сложной гипсометрией и стремления производителей к бесперегрузочному транспортированию в пределах выемочного столба, как наиболее эффективно и экономичному, возникла проблемная ситуация, из которой необходимо найти выход. Горнотехнические условия определяют проблему, требующую решения.

## **2. Анализ и оценка ситуации.**

Системы управления электроприводом конвейера и автоматизированного управления конвейерами транспортной цепи настроены так, что тормоза срабатывают сразу же после отключения электроэнергии при остановке конвейера.

Каждая остановка конвейера, независимо от характера (оперативная, экстренная), всегда происходит с приложением тормозного усилия, создаваемого механическими тормозами привода.

Процесс торможения сопровождается возникновением волновых процессов в замкнутом контуре ленты, которые могут привести к образованию складок ленты.



При оперативной остановке механические тормоза должны срабатывать в конце процесса выбега, приблизительно при 10÷20 % номинальной скорости [27]. В работе констатируется, что управление замедлением конвейера при торможении, как и управление при пуске, важно в равной мере.

Частота остановок подземных ленточных конвейеров имеет случайный характер, и экстренные остановки, сопровождаемые отключением электроэнергии с привода конвейера, имеют преобладающее значение. Среднее значение интервалов времени между последовательными остановками конвейеров составляет 43,2 мин\*. Экстренные остановки происходят в следующих случаях: при срабатывании реле утечки тока на подстанции; срабатывании средств защиты аппаратуры управления электроприводом конвейера и автоматизированного управления конвейером; воздействии на кабель-тросовый выключатель; отключении высокого напряжения с центральной подземной подстанции и других причинах.

В схему управления конвейерами были внесены изменения, которые обеспечивали срабатывание тормозов через 10 с после отключения двигателей при оперативных остановках. Внесенные изменения эффекта не принесли, так как преобладали экстренные остановки.

При экстренном торможении складки могут образовываться:

- при недостаточном натяжении в контуре ленты;
- при большом тормозном усилии, создаваемом механическими тормозными устройствами привода конвейера;
- только при загруженности отдельных участков длины конвейера.

Образованию складок при оперативной остановке конвейера могут способствовать следующие факторы:

- срабатывание тормозов сразу же после отключения электроэнергии;
- загруженность отдельных участков длины конвейера и после внесения в схему управления конвейерами изменения (срабатывание тормозов через 10 с после отключения двигателей);
- величина тормозного усилия привода;
- величина усилия натяжения контура ленты.

---

\* Гребенюк В. В., Галушко А. А. Обследование частоты остановок подземных ленточных конвейеров // Безопасная эксплуатация электромеханического оборудования в шахтах. – Макеевка-Донбасс, 1977. – Вып. 9. – С. 52–55.

### **3. Задачи, связанные с выходом из ситуации, и их обсуждение:**

1. Определить время свободного выбега конвейера: незагруженного; загруженного; только при загруженной части ветви, двигающейся вверх (на подъём); только при загруженной части ветви, двигающейся вниз.

2. Определить значение суммы тормозных усилий, создаваемых приводными блоками привода конвейера.

3. Выявить во время экстренной остановки конвейера влияние на образование складок ленты факторов:

3.1. Увеличения и уменьшения значения натяжения ленты контура.

3.2. Установки ложного сброса в наиболее вогнутой (экстремальной) части става конвейера.

3.3. Установки ложного сброса в средней части длины конвейера.

3.4. Оснащения привода ложного сброса тормозным устройством при расположении его в средней части длины конвейера.

3.5. Установки дополнительного тормозного устройства на концевом барабане конвейера.

3.6. Блокировки работы тормозного устройства на приводе и установки дополнительно тормозного устройства на концевом барабане конвейера.

4. Выявить влияние на образование складок ленты срабатывания механических тормозов во время оперативной остановки конвейера при условиях: в конце процесса выбега при 10 % номинальной скорости; после 10 с от начала свободного выбега.

5. Определить экспериментальным путем значение оптимального тормозного усилия привода конвейера, при котором исключается образование складок ленты и имеет место минимально возможное время выбега, в режиме механического торможения при максимальной загруженности.

В результате решения задач выявлено:

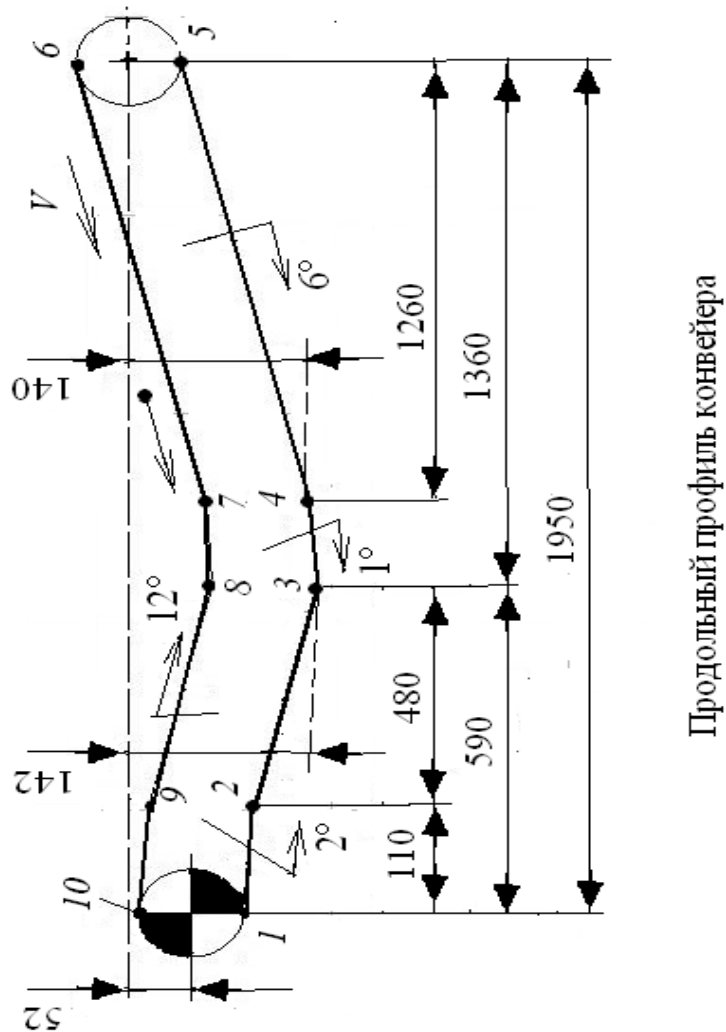
– складки не образуются при срабатывании механических тормозов в конце процесса выбега при 10 % номинальной скорости во время оперативной остановки конвейера;

– установка дополнительного тормозного устройства на концевом барабане конвейера исключает образование складок при экстренных остановках конвейера;

– складки ленты не образуются во время экстренных остановок конвейера при условии создания его тормозными устройствами

тормозного усилия, равного значению оптимального тормозного усилия привода.

#### 4. Предлагаемый вариант решения проблемы.



1. Установить дополнительное тормозное устройство на концевом барабане конвейера; когда концевой барабан переместится в точку экстремального прогиба конвейерного штрека в результате сокращения конвейера, заблокировать его работу.

2. Установить ложный сброс в средней части длины конвейера.

3. Обеспечить при оперативных остановках конвейера срабатывание механических тормозов в конце процесса выбега при 10 % номинальной скорости.

4. Создать тормозными устройствами привода конвейера тормозное усилие, равное значению оптимального тормозного усилия привода.

Наилучший из предлагаемых вариантов?

Наилучшее сочетание из предлагаемых вариантов?

## Приложение 6

### Исходные данные для вычисления по программе **ГАММА**

1 (формат *I3*)  
1 (формат *I3*)  
203.00 (формат *F7.2*)  
58.00 (формат *F7.2*)  
335.0 (формат *F7.1*)  
0.18000E+02 (формат *E12.5*)  
1.00 (формат *F5.2*)  
0.030 (формат *F6.3*)  
55.00 (формат *F6.2*)  
10.00 (формат *F6.2*)  
1.030 (формат *F6.3*)  
0.319200E+09 (формат *E13.6*)  
1.20 (формат *F6.2*)  
3.60 (формат *F6.2*)  
3.15 (формат *F6.2*)  
0.30 (формат *F6.2*)  
0.34200E+03 (формат *E12.5*)  
1.00 (формат *F6.2*)  
1.32 (формат *F6.2*)  
0.85 (формат *F6.2*)  
0.400000E+07 (формат *E13.6*)  
0.015 (формат *F6.3*)  
0.050 (формат *F6.3*)  
2ЛУ 160 с 1РТЛ–2500 (формат 5A4)

## Приложение 7

### Результаты вычисления по программе **ГАММА** уклонного конвейера 2ЛУ160

Без учёта провеса ленты между роlikоопорами конвейера:

$S1A = .763892E + 05$  Н (номинальная загруженность);

$S10KB = .131854E + 06$  Н (холостой ход);

Значение  $DLTKB = .233040E + 00$  м.

С учётом провеса ленты между роlikоопорами конвейера

(решение уравнения методом половинного деления):

$$S10KA = .608985E + 05 \text{ Н};$$

$$\text{Значение } DLTKA = .330875E + 00 \text{ м.}$$

Output

The zeros found are

Корни ( $S10KA$ ) уравнения четвёртой степени определены по п/п *ZPORC* для *Find the zeros a polynomial* с использованием п/п *WRCRN* печати матрицы комплексных чисел:

$$1ZERO = (-.496120E + 04, .000000E + 00);$$

$$2ZERO = (-.155457E + 05, .000000E + 00);$$

$$3ZERO = (.608988E + 05, .000000E + 00);$$

$$4ZERO = (.174962E + 06, .000000E + 00).$$

С учётом уточнения провеса ленты между роlikоопорами конвейера (решение уравнения методом половинного деления):

$$S10KP = .576424E + 05 \text{ Н};$$

$$\text{Значение } DLTKP = .279563E + 00 \text{ м.}$$

Output

The zeros found are

Корни ( $S10KP$ ) уравнения четвёртой степени определены по п/п *ZPORC* для *Find the zeros a polynomial* с использованием п/п *WRCRN* печати матрицы комплексных чисел:

$$1ZERO = (-.293286E + 04, .000000E + 00);$$

$$2ZERO = (-.152288E + 05, .000000E + 00);$$

$$3ZERO = (.576400E + 05, .000000E + 00);$$

$$4ZERO = (.151791E + 06, .000000E + 00).$$

```

*****
I УСЛОВНОЕ ИДЕНТИ- I ЕД. I БЕЗ УЧЕТА I С УЧЕТОМ I С УТОЧНЕНИЕМ I
I ОБОЗНАЧ. I ФИКАТОР I ИЗМ. I ПРОВЕСА I ПРОВЕСА I ПРОВЕСА I
*****
I
I 1. Pp I PP I - I 1 I 1 I 1 I
I 2. Pвпр I PWP I - I 1 I 1 I 1 I
I 3. qг I QG I кг/м I .203000E+03 I .203000E+03 I .203000E+03 I
I 4. qп I QL I кг/м I .580000E+02 I .580000E+02 I .580000E+02 I
I 5. L I L I м I .335000E+03 I .335000E+03 I .335000E+03 I
I 6. β I BEK I град I .180000E+02 I .180000E+02 I .180000E+02 I
I 7. C2 I C2 I - I .100000E+01 I .100000E+01 I .100000E+01 I
I 8. ω3 I W I - I .300000E-01 I .300000E-01 I .300000E-01 I
I 9. qp I QP1 I кг/м I .550000E+02 I .550000E+02 I .550000E+02 I
I 10. qp I QP2 I кг/м I .100000E+02 I .100000E+02 I .100000E+02 I
I 11. k I K I - I .103000E+01 I .103000E+01 I .103000E+01 I
I 12. E I E I H I .319200E+09 I .319200E+09 I .319200E+09 I
I 13. lp I LPB I м I .120000E+01 I .120000E+01 I .120000E+01 I
I 14. lp I LPH I м I .360000E+01 I .360000E+01 I .360000E+01 I
I 15. V I V I м/с I 3.150000 I .315000E+01 I .315000E+01 I
I 16. μ I MU I - I .300000E+00 I .300000E+00 I .300000E+00 I
I 17. α I AMP I град I .342000E+03 I .342000E+03 I .342000E+03 I
*****
I
I ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ
I

```

I 18.	$K_{TC}$	I	KZTF	I	-	I	.100000E+01	I	.100000E+01	I	.100000E+01	I
I 19.	$K_{ND}$	I	KZND	I	-	I	.132000E+01	I	.132000E+01	I	.132000E+01	I
I 20.	$\eta_{гр}$	I	KPDTR	I	-	I	.850000E+00	I	.850000E+00	I	.850000E+00	I
I 21.	$S_p$	I	RSL	I	H	I	.400000E+07	I	.400000E+07	I	.400000E+07	I
I 22.	$S_{ном}$	I	SHOM	I	-	I	.150000E-01	I	.150000E-01	I	.150000E-01	I
I 23.	$S_{ном.г}$	I	SHOMG	I	-	I	.500000E-01	I	.500000E-01	I	.500000E-01	I
I 24.	$\eta_K$	I	T1, T2, T3, T4, T5I	I	-	I	2ЛУ160 с 1РТЛ-2500	I		I		I
I		I	РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК	I		I		I		I		I
I 1.	$\beta_{РК}$	I	BERK	I	град	I	.324798E+01	I	.324798E+01	I	.324798E+01	I
I		I	КОНТРОЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ	I		I		I		I		I
I 1K.	$S_{1XX}^K$	I	S10K	I	H	I	.131854E+06	I	.608988E+05	I	.576400E+05	I
I 2K.	$\sum \Delta L(S_{1A})$	I	DLTK	I	M	I	.233040E+00	I	.330875E+00	I	.279563E+00	I
I		I	ЗНАЧЕНИЯ НАТЯЖЕНИЙ ЛЕНТЫ В ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧКАХ ПРИ НОМИНАЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ	I		I		I		I		I
I 1.	$S_{1A}$	I	S1A	I	H	I	.763892E+05	I	.763892E+05	I	.763892E+05	I
I 4.	$S_{4A}$	I	S4A	I	H	I	.319265E+06	I	.319265E+06	I	.319265E+06	I
I		I	ЗНАЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗ И С УЧЕТОМ ПРОВЕСА ЛЕНТЫ МЕЖДУ РОЛИКОПОРАМИ	I		I		I		I		I
I 1.	$\sum \Delta L(S_{1A}^B)$	I	DLT	I	M	I	.233040E+00	I	.330905E+00	I	.280000E+00	I
I 2.	$S_{1XX}^B$	I	S10	I	H	I	.131854E+06	I	.608985E+05	I	.576424E+05	I
I 7.	$N_z^B$	I	NDZ	I	кВт	I	.118809E+04	I	.118809E+04	I	.118809E+04	I
I 9.	$N_{XX}^B$	I	ND0	I	кВт	I	.946623E+02	I	.842494E+02	I	.837715E+02	I

Продолжение прил. 7

ЗНАЧЕНИЯ НАТЯЖЕНИЯ ЛЕНТЫ В ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧКАХ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА БЕЗ УЧЕТА ЕЕ ПРОВИСАНИЯ МЕЖДУ РОЛИКОПОРАМИ ПРИ:

А) РАЗГРУЗКЕ ЛК

I	T, C	I	DLTHP, M	DLTBZZ, M	DLTVH, M	PS1B, H	I	PS2B, H	I	PS3B, H	I	PS4B, H	ISDLTBV, M	INPRBBV, KBT	I	900.1I
I	10.6I	I	.05261I	.18043I	.00000I	76389.2I	I	23864.0I	I	24579.9I	I	319265.1I	.23304I		I	817.9I
I	21.3I	I	.06366I	.16530I	.00408I	86917.5I	I	34392.3I	I	35424.1I	I	307613.0I	.23304I		I	735.6I
I	31.9I	I	.07354I	.14858I	.01092I	96338.9I	I	43813.7I	I	45128.1I	I	294820.6I	.23304I		I	653.1I
I	42.5I	I	.08227I	.13061I	.02016I	104653.1I	I	52127.9I	I	53691.7I	I	280887.9I	.23304I		I	570.5I
I	53.2I	I	.08983I	.11175I	.03145I	111860.2I	I	59335.0I	I	61115.1I	I	265815.0I	.23304I		I	487.8I
I	63.8I	I	.09624I	.09237I	.04443I	117960.3I	I	65435.1I	I	67398.2I	I	249601.7I	.23304I		I	405.0I
I	74.4I	I	.10148I	.07283I	.05874I	122953.3I	I	70428.1I	I	72540.9I	I	232248.1I	.23304I		I	322.1I
I	85.1I	I	.10556I	.05348I	.07401I	126839.2I	I	74314.0I	I	76543.5I	I	213754.3I	.23304I		I	239.0I
I	95.7I	I	.10847I	.03467I	.08990I	129618.0I	I	77092.8I	I	79405.6I	I	194120.1I	.23304I		I	155.9I
I	106.3I	I	.11023I	.01678I	.10603I	131289.7I	I	78764.5I	I	81127.4I	I	173345.6I	.23304I		I	72.5I
I	106.3I	I	.11082I	.00016I	.12206I	131854.3I	I	79329.1I	I	81708.9I	I	151430.8I	.23304I			

Б) ЗАГРУЗКЕ ЛК

I	T, C	I	DLTHP, M	DLTBZQ, M	DLTBH0, M	ZS1B, H	I	ZS2B, H	I	ZS3B, H	I	ZS4B, H	ISDLTBZ, M	INPRBBZ, KBT	I	153.9I
I	10.6I	I	.09977I	.00897I	.12430I	121325.9I	I	68800.8I	I	70864.8I	I	162857.8I	.233304I		I	236.2I
I	21.3I	I	.08988I	.01900I	.12416I	111904.7I	I	59379.5I	I	61160.9I	I	175650.2I	.23304I		I	318.7I
I	31.9I	I	.08116I	.03043I	.12145I	103590.4I	I	51065.3I	I	52597.2I	I	189582.9I	.23304I		I	401.2I
I	42.5I	I	.07359I	.04364I	.11581I	96383.3I	I	43858.1I	I	45173.9I	I	204655.8I	.23304I		I	483.9I
I	53.2I	I	.06719I	.05897I	.10688I	90283.2I	I	37758.0I	I	38890.7I	I	220869.1I	.23304I		I	566.7I
I	63.8I	I	.06195I	.07679I	.09430I	85290.2I	I	32765.0I	I	33748.0I	I	238222.7I	.23304I		I	649.7I
I	74.4I	I	.05787I	.09745I	.07772I	81404.3I	I	28879.1I	I	29745.5I	I	256716.5I	.23304I		I	732.7I
I	85.1I	I	.05495I	.12132I	.05677I	78625.5I	I	26100.4I	I	26883.4I	I	276350.7I	.23304I		I	815.9I
I	95.7I	I	.05320I	.14875I	.03109I	76953.9I	I	24428.7I	I	25161.6I	I	297125.3I	.23304I		I	899.2I
I	106.3I	I	.05261I	.18010I	.00033I	76389.3I	I	23864.1I	I	24580.0I	I	319040.1I	.23304I			

I=23 Количество итераций J= 18



Продолжение прил. 7

ЗНАЧЕНИЯ НАТЯЖЕНИЯ ЛЕНТЫ В ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧКАХ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА С УЧЕТОМ ЕЕ ПРОВИСАНИЯ МЕЖДУ

РОЛИКОПОРАМИ ПРИ:

А) ЗАГРУЗКЕ ЛК

I	T, C	I	DLTННР, мI	DLTBZZ, мI	DLTBVY, мI	PS1A, H I	PS2A, H I	PS3A, H I	PS4A, H I	ISDLTAP, мI	NPРВАР, кВтI
I	.0I	.11686I	.21405I	.00000I	.76389.2I	23864.0I	24580.0I	319265.2I	.33091I	900.1I	
I	10.6I	.14386I	.18183I	.00522I	69630.1I	17104.9I	17618.0I	289806.9I	.33091I	815.9I	
I	21.3I	.16898I	.15103I	.01090I	66428.2I	13903.1I	14320.2I	264012.7I	.33091I	732.2I	
I	31.9I	.19083I	.12344I	.01664I	64568.7I	12043.6I	12404.9I	239601.0I	.33091I	648.6I	
I	42.5I	.20934I	.09910I	.02246I	63372.5I	10847.3I	11172.7I	215872.6I	.33091I	565.1I	
I	53.2I	.22481I	.07761I	.02849I	62553.5I	10028.3I	10329.2I	192532.7I	.33090I	481.7I	
I	63.8I	.23754I	.05855I	.03482I	61972.9I	9447.8I	9731.2I	169438.4I	.33091I	398.3I	
I	74.4I	.24775I	.04160I	.04156I	61556.1I	9031.0I	9301.9I	146512.7I	.33091I	314.8I	
I	85.1I	.25569I	.02646I	.04876I	61258.3I	8733.1I	8995.1I	123709.6I	.33091I	231.4I	
I	95.7I	.26162I	.01282I	.05647I	61048.7I	8523.5I	8779.3I	100997.4I	.33091I	148.0I	
I	106.3I	.26602I	.00013I	.06475I	60900.0I	8374.8I	8626.0I	78347.9I	.33090I	64.7I	

Б) ЗАГРУЗКЕ ЛК

I	T, C	I	DLTННР, мI	DLTBZQ, мI	DLTBVY, мI	ZS1A, H I	ZS2A, H I	ZS3A, H I	ZS4A, H I	ISDLTAP, мI	NPРВАР, кВтI
I	10.6I	.20194I	.05787I	.07110I	63818.4I	11293.2I	11632.0I	103625.0I	.33090I	147.5I	
I	21.3I	.18142I	.06450I	.08498I	65296.4I	12771.3I	13154.4I	127643.7I	.33090I	231.1I	
I	31.9I	.16589I	.07087I	.09414I	66745.8I	14220.6I	14647.3I	151632.9I	.33090I	314.6I	
I	42.5I	.15304I	.07997I	.09790I	68271.7I	15746.5I	16218.9I	175700.9I	.33091I	398.1I	
I	53.2I	.14231I	.09255I	.09604I	69888.8I	17363.6I	17884.5I	199862.8I	.33091I	481.7I	
I	63.8I	.13348I	.10894I	.08848I	71570.2I	19045.1I	19616.4I	224091.1I	.33091I	565.2I	
I	74.4I	.12650I	.12927I	.07513I	73242.4I	20717.3I	21338.8I	248309.8I	.33091I	648.8I	
I	85.1I	.12136I	.15358I	.05597I	74761.8I	22236.7I	22903.8I	272371.1I	.33091I	732.3I	
I	95.7I	.11812I	.18180I	.03099I	75899.5I	23374.3I	24075.5I	296039.2I	.33091I	815.8I	
I	106.3I	.11686I	.21371I	.00033I	76388.3I	23863.1I	24579.0I	319039.0I	.33091I	899.2I	

I=23 Количество итераций J= 18

\*\*\*\*\*

ЗНАЧЕНИЯ НАТЯЖЕНИЯ ЛЕНТЫ В ХАРАКТЕРНЫХ  
 ТОЧКАХ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА С УТОЧНЕНИЕМ ЕЕ ПРОВИСАНИЯ МЕЖДУ РОЛИКООПОРАМИ ПРИ:  
 А) РАЗГРУЗКЕ ЛК

I	.0I	.08337I	.19663I	.00000I	76389.0I	23863.8I	24579.7I	319264.9I	.28000I	900.1I
I	10.6I	.11151I	.16425I	.00424I	64657.4I	12132.3I	12496.2I	284685.1I	.28000I	815.4I
I	21.3I	.13555I	.13538I	.00907I	61722.0I	9196.8I	9472.7I	259165.2I	.28000I	731.7I
I	31.9I	.15594I	.11010I	.01396I	60227.7I	7702.5I	7933.6I	235129.8I	.28000I	648.2I
I	42.5I	.17300I	.08800I	.01900I	59325.3I	6800.2I	7004.2I	211704.0I	.28000I	564.7I
I	53.2I	.18715I	.06852I	.02432I	58730.6I	6205.4I	6391.6I	188595.1I	.28000I	481.3I
I	63.8I	.19868I	.05129I	.03003I	58321.3I	5796.1I	5970.0I	165677.2I	.28000I	397.8I
I	74.4I	.20777I	.03603I	.03620I	58036.3I	5511.1I	5676.5I	142887.3I	.28000I	314.4I
I	85.1I	.21457I	.02257I	.04287I	57841.4I	5316.3I	5475.8I	120190.3I	.28000I	231.1I
I	95.7I	.21924I	.01069I	.05007I	57715.6I	5190.4I	5346.1I	97564.3I	.28000I	147.7I
I	106.3I	.22205I	.00010I	.05785I	57643.0I	5117.8I	5271.4I	74993.2I	.28000I	64.3I

А) ЗАГРУЗКЕ ЛК

I	T, c	I	DLTHP, M	DLTBZQ, M	DLTBH0, M	ZS1P, H	ZS2P, H	ZS3P, H	ZS4P, H	ISDLTPZ, MINPRBPZ, KBTI
I	10.6I	.16555I	.04841I	.06604I	59690.1I	7164.9I	7379.9I	99372.9I	.28000I	147.1I
I	21.3I	.14755I	.05175I	.08070I	60773.4I	8248.2I	8495.6I	122985.0I	.28000I	230.5I
I	31.9I	.13312I	.05651I	.09037I	61945.3I	9420.1I	9702.7I	146688.4I	.28000I	314.0I
I	42.5I	.12086I	.06451I	.09463I	63285.8I	10760.6I	11083.4I	170565.4I	.28000I	397.6I
I	53.2I	.11045I	.07623I	.09332I	64840.4I	12315.2I	12684.6I	194663.0I	.28000I	481.1I
I	63.8I	.10176I	.09187I	.08638I	66651.1I	14125.9I	14549.7I	219024.3I	.28000I	564.7I
I	74.4I	.09471I	.11159I	.07371I	68759.9I	16234.7I	16721.7I	243692.8I	.28000I	648.3I
I	85.1I	.08925I	.13553I	.05522I	71205.0I	18679.9I	19240.3I	268707.6I	.28000I	731.9I
I	95.7I	.08538I	.16383I	.03080I	73984.8I	21459.6I	22103.4I	294067.0I	.28000I	815.6I
I	106.3I	.08338I	.19629I	.00034I	76384.2I	23859.0I	24574.8I	319034.8I	.28000I	899.2I

I=23 Количество итераций J= 15

\*\*\*\*\*

## Приложение 8

### Имитационно-игровое моделирование

Имитационно-игровое моделирование является одним из методов интерактивного обучения студентов при проведении лабораторных занятий. Имитационно-игровое моделирование представляет собой воспроизведение в условиях обучения процессов, происходящих в реальных условиях. Занятие следует проводить в компьютерном классе с системой, при которой на экранах компьютеров класса воспроизводится такая же информация, что и на экране преподавателя.

Тема лабораторного занятия: Влияние заштыбовки (загрязнения) ленточного конвейера на повышение энергоёмкости транспортирования (повышение необходимой мощности двигателя привода).

**Предпосылки для выбора темы** лабораторного занятия. При эксплуатации ленточных конвейеров в реальных условиях ленточные конвейеры «загрязняются» (заштыбовываются) по различным причинам: 1. Неэффективная очистка ленты и барабанов очистными устройствами. 2. Неудовлетворительное состояние загрузочных и перегрузочных пунктов, которые не обеспечивают центральную загрузку грузом ленты и не исключают просыпание горной массы при транспортировании. 3. Неудовлетворительное техническое состояние конвейерного става и роликов, которое приводит к сходу ленты в сторону и возникновению просыпания груза на почву горной выработки. 4. Наличие серповидности ленты, которая трудно поддаётся центрированию обычными способами и приводит к сходу ленты в сторону, вследствие чего происходит просыпание груза на почву горной выработки. 5. Переполнение вместимости загрузочных и перегрузочных устройств при экстренной остановке конвейерной линии из-за различного времени выбега смежных конвейеров, в результате которого происходит просыпание горной массы и заштыбовка пункта перегрузки. 6. Вынос из переполненного пункта перегрузки на линию при пуске конвейера груза, который ссыпается с ленты и заштыбовывает став конвейера.

Экстренные остановки конвейерной линии могут быть обусловлены различными причинами: срабатыванием реле утечки на питающей подстанции; срабатыванием средств защиты аппаратуры управления электроприводом конвейера и аппаратуры автоматизированного управления конвейером (в том числе датчика заштыбов-

ки от переполнения вместимости пункта перегрузки); воздействием на кабель-тросовые выключатели; отключением с питающих подстанций высокого напряжения и т. д. Исследования показали, что экстренные остановки подземных ленточных конвейеров имеют преобладающее значение.

Из-за нерешённости проблемы остановки всех конвейеров в транспортной цепи за одинаковое время при экстренной остановке конвейерной линии практически не представляется возможным исключить пересыпок в местах перегрузки конвейеров, а следовательно, и их заштыбовки. В соответствии с Руководством по эксплуатации подземных ленточных конвейеров [14, п. 5.10] при заштыбовке перегрузочного пункта конвейер должен быть немедленно остановлен. Заштыбовки в пунктах перегрузки приводят к повышению расхода электроэнергии на транспортирование, форсированному износу ленты, к возникновению пробуксовок ленты на приводных барабанах, снижению уровня безопасной работы и другим отрицательным последствиям (могут быть причиной пожаров и взрывов).

**Процессы, происходящие в реальных условиях эксплуатации** во время работы ленточного конвейера в течение одной смены, можно охарактеризовать следующим образом. Начало рабочей смены на очистном участке. Конвейер работает без загрязнений (конвейер не заштыбован), принимая грузопоток из лавы, то есть имеют место хорошие условия эксплуатации. В течение смены, как правило, случаются экстренные остановки конвейерной линии, способствующие заштыбовке непосредственно пункта перегрузки и конвейерной ленты. Кроме этой причины заштыбовке конвейера могут способствовать и указанные выше причины, то есть условия эксплуатации ухудшаются к концу рабочей смены.

Цель: промоделировать на математической модели влияние на энергоёмкость транспортирования ухудшения условий эксплуатации ленточного конвейера (заштыбовки, загрязнения [3]).

Задачи:

– выбрать тип конвейера, его технические и технологические параметры;

– выбрать горную выработку, в которой ленточный конвейер при работе наиболее подвергается загрязнению и наиболее чувствителен к повышению энергетических затрат на транспортирование при загрязнении;

- выбрать из 24 показателей в математической модели показатель, характеризующий загрязнение конвейера;
- выбрать вычислительную программу для математического моделирования влияния ухудшения условий эксплуатации ленточного конвейера на повышение энергоёмкости транспортирования;
- выполнить расчёты необходимой мощности привода конвейера на транспортирование при различных условиях эксплуатации;
- проанализировать результаты расчёта.

В результате обсуждения поставленных задач приняты следующие решения:

1. За объект исследования принимается конвейер типа 2ПТ120 длиной 1200 м с приводом в головной части става, установленный в конвейерном штреке очистного забоя, пройденного горизонтально, так как горизонтально установленный ленточный конвейер наиболее чувствителен к повышению энергетических затрат на транспортирование при загрязнении.

2. В качестве показателя в математической модели, характеризующего загрязнение конвейера, приняты значения коэффициентов сопротивления движению ленты по роликам: 0,025; 0,030; 0,035; 0,040; 0,045; 0,050; 0,060 [3]; значение коэффициента сопротивления движению, равное 0,025, характеризует хорошие условия эксплуатации (без загрязнения), при которых энергоёмкость транспортирования наименьшая.

3. Для выполнения расчётов принимается вычислительная программа *ГАММА*, так как привод расположен в головной части става и конвейер установлен в горизонтальной горной выработке.

4. Принят следующий порядок расчёта. При выполнении первого расчёта (№ 1) по программе *ГАММА* в файл «исходные данные» вписывается минимальное значение коэффициента сопротивления движению, равное 0,025 (все другие значения расчётных показателей, указанные в файле «исходные данные», остаются без изменения). Полученные результаты расчёта сохраняются в файле «результаты расчёта» № 1. При выполнении второго расчёта (№ 2) принимается значение коэффициента сопротивления движению, равное 0,030, и полученные результаты расчёта сохраняются в файле «результаты расчёта» № 2. Таким образом, последовательно вводя указанные значения коэффициента сопротивления движению в файл

«исходные данные» и выполняя вычисления, получим результаты, сохраняемые в соответствующем файле «результаты расчёта».

5. Оценка влияния различных условий эксплуатации на энергоёмкость транспортирования производится по результатам расчёта, сохранённым в файлах «результаты расчёта».

Анализ результатов расчёта показывает, что необходимая мощность двигателя привода возрастает с ухудшением условий эксплуатации, что приводит к повышению энергоёмкости транспортирования ленточным конвейером и другим отрицательным последствиям.

## Приложение 9

### Презентация

Презентация является одним из методов интерактивного обучения, сущность которого состоит в представлении материалов лекции в варианте – лекция-презентация. По мнению автора, имеющего большой опыт педагогической работы, лекция-презентация должна проводиться в интерактивном компьютерном классе с возможностью отображения информации экрана преподавателя на экраны компьютеров студентов и активирования управлением курсором манипулятором преподавателя. В процессе рассмотрения материала каждой позиции плана лекции ведётся интенсивный диалог со студентами с целью исключения потери ими внимания и контроля процесса понимания, путём использования преподавателем активированного курсора – курсор устанавливается на объект, и преподаватель просит высказаться по указанному объекту конкретного студента или нескольких, называя их фамилии. В лекциях-презентациях должен излагаться сложный, насыщенный формулами объёмный материал, носящий явно выраженный теоретический характер. Материалы лекций у каждого студента остаются на флэш-носителе информации, которые при необходимости могут быть использованы. Лекция-презентация является эффективным инструментом освоения профессиональных компетенций и нового опыта.

**Пример лекции-презентации.** Тема презентации: определение значения контрольного натяжения ленты конвейера.

Цель лекции: получение новых знаний и умений, обеспечивающих формирование готовности студента в производственных условиях определять значение контрольного натяжения ленты кон-

вейера с учётом работы его в различных горнотехнических условиях, с применением достаточно сложных математических вычислений (решением уравнений четвёртой и пятой степени).

Задачи лекции:

– вовлечь в процесс познания студентов всей группы за минимальное время, используя возможности интерактивного компьютерного класса; сущность вовлечения сводится к тому, что не все пришедшие на лекцию психологически готовы к восприятию излагаемого преподавателем материала;

– использовать оперативную обратную связь как форму актуализации усвоения материала лекции в процессе её проведения; оперативная обратная связь является важнейшим звеном в системе обучения\*; эффективность обучения (в известных пределах) прямо пропорциональна частоте и объёму обратной связи\*\*;

– довести информацию до студенческой группы в простом и удобном виде, чтобы помочь студентам понять и усвоить новые знания;

– дать возможность каждому студенту записать содержание материала презентации на флэш-носитель, который при необходимости может быть использован студентом.

В процессе проведения лекции последовательно представляются следующие изображения и тексты из данного пособия (к каждому из которых даётся подробное пояснение):

– рис. 2.1, 2.2 (схемы провисания ленты между роlikоопорами);

– рис. 2.4, 2.5 (схемы процесса разгрузки и загрузки ленточно-го конвейера);

– текст записи уравнений движения конвейера (учитывающих все действующие силы) при различных формах провеса ленты между роlikоопорами (без учёта провеса, с учётом провеса по параболе, с учётом провеса по квадратичной параболе);

– рис. 2.10 (графики к определению расчётного значения корня уравнения четвёртой степени);

---

\* Меретукова З. К. Подготовка будущего учителя к актуализации знаний учащихся как средству оперативной обратной связи // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. : Педагогика и психология, 2013. – Вып. 3. – С. 61–68.

\*\* Подласый И. П. Исследование закономерностей дидактического процесса. – Киев, 1991. – 362 с.

– рис. 2.11 (схемы к определению контрольного значения натяжения ленты натяжным устройством конвейера);

– рис. 2.12 (характер изменения натяжения ленты в точке  $I$  замкнутого контура во время процессов разгрузки и загрузки конвейера при различных формах провеса ленты);

– текст записи всех корней уравнения четвёртой степени, определённых по подпрограмме *ZPLRC* математической библиотеки *IMSL*;

– таблицы с основными показателями моделирования процессов разгрузки и загрузки конвейера, результаты которых подтверждают правомерность выбора действительного корня методом сравнительной оценки корней решаемых уравнений;

– таблица значений контрольного натяжения, определённых при различных формах провеса ленты между роlikоопорами.

В заключительной части презентации обязательно совместно со студентами подводятся итоги. Выводы по изученному теоретическому материалу делает ведущий преподаватель.

Эффективность презентации, как одного из методов интерактивного процесса обучения, имеет место только тогда, когда преподаватель проводит занятие в интерактивном компьютерном классе. При этом представляется возможным взаимодействовать со студентом в режиме беседы по текущим изображениям на экране, и все студенты оказываются вовлечёнными в процесс познания.

## Приложение 10

### Моделирование производственной ситуации

Моделирование производственной ситуации является одним из методов интерактивного обучения студентов при проведении лабораторных занятий. Сущность метода состоит в разборе сложившейся на производстве ситуации и поиске варианта выхода из нее.

**Пример** моделирования производственной ситуации на тему: Определение необходимого числа конвейеров для установки на конвейерном штреке длиной 3000 м, проведённом горизонтально, из условия наличия в производственных условиях трёх агрегатных прочностей резиноканевой ленты различной длины и конвейеров типа 2ПТ120, оснащённых этими лентами. Конвейеры устанавливаются с расположением привода в головной части става. При мо-



делировании производственной ситуации применяется программа *GAMMA*, предназначенная для моделирования переходных режимов ленточных конвейеров (с учётом расположения привода в головной части става горизонтальных и уклонных конвейеров).

Сущность проблемной ситуации состоит в том, что имеющаяся в производственных условиях транспортёрную ленту трёх разных агрегатных прочностей можно использовать при оснащении конвейеров, устанавливаемых на конвейерном штреке. При этом контур каждого конвейера должен состоять только из отрезков ленты одинаковой прочности. Стоимость ленты составляет 40÷70 % стоимости конвейера. Это наиболее дорогой и наименее долговечный элемент ленточного конвейера. Производственное объединение испытывает финансовые трудности и не имеет возможности приобрести новую ленту.

Цель моделирования ситуации: определить число конвейеров и длину каждого конвейера для установки их на конвейерном штреке протяжённостью 3000 м, используя имеющиеся транспортёрную ленту трёх разных прочностей и различной длины и конвейеры 2ПТ120, оснащённые этими лентами.

Задачи:

- определить длины трёх конвейеров, соответствующих длинам имеющейся ленты с определённой агрегатной прочностью;

- определить для каждой агрегатной прочности ленты её основные показатели: массу одного метра (кг/м); разрывное усилие (Н); продольную жёсткость ленты (Н);

- ввести в файл «исходные данные» значения указанных показателей для конвейера, имеющего наибольшую длину (все другие значения расчётных показателей, указанные в файле «исходные данные», остаются без изменения), и выполнить расчёт № 1 по программе *GAMMA*;

- ввести в файл «исходные данные» значения указанных показателей для конвейера, имеющего среднюю длину, и выполнить расчёт № 2;

- ввести в файл «исходные данные» значения указанных показателей для конвейера, имеющего наименьшую длину, и произвести расчёт № 3;

- произвести анализ результатов расчёта № 1, № 2, № 3, представленных в соответствующих файлах «результаты расчёта», на

соответствие полученных значений коэффициента запаса прочности ленты нормативным значениям ОСТ 12.14.130-79.

Если при анализе будет установлено, что в каком-либо из расчётов полученное значение коэффициента запаса прочности ленты меньше нормативного значения, то уменьшается приведённая длина конвейера и повторно выполняется расчёт. Уменьшается длина и повторяется расчёт до тех пор, пока значение коэффициента запаса прочности ленты не будет соответствовать требованиям отраслевого стандарта.

В результате решения выше сформулированных задач определена суммарная длина трёх конвейеров, оснащённых лентами, прочностные параметры которых соответствуют требованиям отраслевого стандарта. При этом суммарная их длина больше длины конвейерного штрека, а двух с наибольшей длиной – меньше. Принимается решение установки трёх конвейеров в следующем порядке. Первым в начале конвейерного штрека устанавливается конвейер, имеющий наибольшую длину, вторым – имеющий среднюю длину, а третьим – имеющий наименьшую длину. В связи с тем, что длина конвейерного штрека меньше суммарной длины трёх конвейеров, третий конвейер укорачивается до длины, равной разности длин конвейерного штрека и суммы первых двух конвейеров. Для принятой длины третьего конвейера соответственно выполняется дополнительный расчёт по программе *ГАММА*.

В результате моделирования производственной ситуации был найден выход из неё. Для решения проблемы предложено установить на конвейерном штреке три конвейера 2ПТ120 с длинами, при которых прочностные параметры ленты и установленная мощность приводов соответствуют нормативным требованиям отраслевого стандарта. Необоснованное завышение установленной мощности приводит к повышенному потреблению электроэнергии на транспортирование, так как у асинхронных двигателей реактивная мощность составляет 30÷50 % номинальной мощности.

## **Приложение 11**

### **Моделирование производственного процесса**

Моделирование производственного процесса является одним из методов интерактивного обучения студентов при приведении ла-

бораторных занятий. Суть метода состоит в моделирование производственного процесса, в котором оборудование функционирует с оптимальными показателями (параметрами).

**Пример** моделирования производственного процесса на тему: Определить для процесса транспортирования по горной выработке оптимальный тип ленточного конвейера.

Исходные данные: длина горизонтальной горной выработки 1200 м. Один конвейер на всю длину выработки. Производительность конвейера не менее 1470 т/ч. Возможно применение в горной выработке конвейера с шириной ленты 1000, 1200 и 1400 мм. Лента резиноканевая. Критерий оптимизации – минимальные приведённые затраты.

При моделировании транспортного процесса применяется вычислительная программа *ГАММА*, предназначенная для моделирования переходных режимов в ленточных конвейерах.

Сущность оптимизации транспортного процесса состоит в том, что стоимость ленты составляет 40÷70 % стоимости конвейера. Это наиболее дорогой и наименее долговечный элемент ленточного конвейера. Завышение прочностных параметров ленты приводит к повышению экономичности транспортирования, особенно для конвейерного штрека очистного забоя, длина которого сокращается по мере продвижения фронта очистных работ. При этом прочностные параметры ленты недоиспользуются и по мере сокращения длины конвейера коэффициент запаса прочности увеличивается.

Цель моделирования: определить оптимальный тип ленточного конвейера из трёх возможных для применения в горной выработке, по критерию – минимальные приведённые затраты на процесс транспортирования по горной выработке.

Задачи:

– выбрать типы конвейеров и принять их технические характеристики;

– установить по каталогу завода-изготовителя транспортёрных лент тип ленты и число возможных прокладок для данного типа;

– принять ленту шириной 1000 мм с минимальным числом прокладок, определить её основные показатели: массу одного метра (кг/м); разрывное усилие (Н); продольную жёсткость ленты (Н);

– ввести в файл «исходные данные» значения указанных показатели, определённых при минимальном числе прокладок (все другие значения расчётных показателей, указанные в файле «исходные данные» остаются без изменения), и произвести вычисление по программе *ГАММА*;

– произвести анализ результатов расчёта, представленных в файле «результаты расчёта».

Если при минимальном числе прокладок значение коэффициента запаса прочности ленты после проведённого расчёта получится меньше нормативного, требуемого ОСТ 12.14.130-79, то принимается для последующего расчёта лента с числом прокладок на одну больше, чем в предыдущем расчёте, при минимальном числе прокладок. Определяются снова её основные показатели: масса одного метра (кг/м); разрывное усилие (Н); продольная жёсткость ленты (Н).

Производится вычисление при обновлённых показателях. После проведённого расчёта полученное значение коэффициента запаса прочности ленты сравнивается с нормативным значением коэффициента запаса прочности ленты, и если значение меньше требуемого нормативного, то принимается лента с числом прокладок на одну больше, чем в предыдущем расчёте.

Это делается до тех пор, пока значение коэффициента запаса прочности ленты будет соответствовать требованиям отраслевого стандарта. Аналогичная работа выполняется и для лент шириной 1200 и 1400 мм.

Для каждого типа конвейера определяются приведённые затраты по известной формуле [32, 49 и др.].

За оптимальный тип ленточного конвейера принимается тип, при применении которого процессе транспортирования оценивается минимальными приведёнными затратами.

## Список использованной литературы

1. Полунин, В. Г. Эксплуатация мощных ленточных конвейеров / В. Г. Полунин, Г. Н. Гуленко. – Москва : Недра, 1986. – 344 с.
2. Системы внутришахтного транспорта / Г. Я. Пейсахович [и др.]. – Москва : Недра, 1977. – 349 с.
3. Шахмейстер, Л. Г. Подземные конвейерные установки / Л. Г. Шахмейстер, Г. И. Солод. – Москва : Недра, 1976. – 432 с.
4. Мартынов, М. В. Автоматизированный электропривод в горной промышленности / М. В. Мартынов, Н. Г. Переслегин. – Москва : Недра, 1977. – 375 с.
5. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 576 с.
6. Васильев, М. В. Транспортные процессы и оборудование на карьерах. – Москва : Недра, 1986. – 240 с.
7. Волотковский, В. С. Выбор оборудования карьерного конвейерного транспорта / В. С. Волотковский, Г. Д. Кармаев, М. И. Драя. – Москва : Недра, 1990. – 192 с.
8. Васильев, К. А. Транспортные машины и оборудование шахт и рудников : учеб. пособие [электронный ресурс] / К. А. Васильев, А. К. Николаев, К. Г. Сазонов. – Санкт-Петербург : Лань, 2012. – 544 с.
9. Бухтий, Н. В. Пожарная безопасность подземных ленточных конвейеров / Н. В. Бухтий, И. П. Белик, Ю. М. Маркович // Безопасность труда в промышленности. – 1988. – № 7. – С. 44–45.
10. Федорович, А. П. Ленточные конвейеры самые опасные. Пожарная безопасность угольных шахт. <http://xreferat.ru/8/1624-1-lentochnye-konveiyery-samy-e-opasnye-pozharnaya-bezopasnost-ugolnyh-shaht.html> (дата обращения 27.11.2014).
11. Профилактика экзогенных пожаров. <http://coalguide.ru/podzemnye-pozhary-i-gornospasatelnoe-delo/403-profilaktika-ekzogennykh-rozharov> (дата обращения 27.11.2014).
12. Справочник механика открытых работ. Экскавационно-транспортные машины непрерывного действия / М. И. Щадов [и др.] ; под ред. М. И. Щадова, В. М. Владимирова. – Москва :

Недра, 1989. – 487 с.

13. Транспорт на горных предприятиях / под общей ред. Б. А. Кузнецова. – Москва : Недра, 1976. – 552 с.

14. Руководство по эксплуатации подземных ленточных конвейеров в угольных и сланцевых шахтах. – Москва : ИГД им. А. А. Скочинского, 1995. – 251 с.

15. Андреев, А. В. Транспортные машины и комплексы для открытой добычи полезных ископаемых / А. В. Андреев, Е. Е. Шешко. – Москва : Недра, 1970. – 432 с.

16. Ленточные конвейеры в горной промышленности / В. А. Дьяков [и др.] ; под ред. А. О. Спиваковского. – Москва : Недра, 1982. – 392 с.

17. Спиваковский, А. О. Теоретические основы расчёта ленточных конвейеров / А. О. Спиваковский, В. Г. Дмитриев. – Москва : Наука, 1977. – 154 с.

18. Запенин, И. В. Моделирование переходных процессов ленточных конвейеров / И. В. Запенин, В. Е. Бельфор, Ю. А. Селищев. – Москва: Недра, 1969. – 55 с.

19. Панкратов, С. А. Динамика машин для открытых горных и земляных работ. – Москва : Машиностроение, 1967. – 447 с.

20. Запенин, В. И. Метод расчёта на АВМ переходных режимов ленточных конвейеров со сложным профилем трассы / В. И. Запенин, М. А. Гладких // Шахтный и карьерный транспорт. Вып. 2 / под общей ред. А. О. Спиваковского. – Москва : Недра, 1975. – С. 67–71.

21. Лескевич, В. И. Исследование пуска ленточных конвейеров : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1965. – 16 с.

22. Андреев, А. В. Транспортные машины и автоматизированные комплексы открытых разработок / А. В. Андреев, В. А. Дьяков, Е. Е. Шешко. – Москва : Недра, 1975. – 464 с.

23. Шахмейстер, Л. Г. Теория и расчёт ленточных конвейеров / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев. – Москва : Машиностроение, 1987. – 336 с.

24. Галкин, В. И. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В. И. Галкин [и др.]. – Москва : Изд-во МГГУ, 2005. – 543 с.

25. Гребенюк, В. В. Исследование режимов работы тормозных устройств подземных ленточных конвейеров : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Макеевка-Донбасс, 1976. – 16 с.

26. Рудничный транспорт и механизация вспомогательных работ: каталог-справочник / под ред. В. М. Щадова. – Москва : Горная книга, 2010. – 534 с.

27. Walker, A. Modern underground belt conveying practice in British coal mines / A. Walker, S Silbert // Ninth Commonwealth Mining and Metallurgical Congress, 1966. – Vol 1. – London : The Institution of Mining and Metallurgy, 1970. – P. 111–138.

28. Подпорин, Т. Ф. Моделирование переходных режимов ленточных конвейеров : учеб. пособие : в 2 ч. / ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2002. – Ч. 2 : Моделирование процесса выбега ленточных конвейеров. – 99 с.

29. Дзюбан, В. С. Справочник энергетика угольной шахты / В. С. Дзюбан, Я. С. Риман, А. К. Маслий. – Москва : Недра, 1983. – 542 с.

30. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока : учеб. для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – Санкт-Петербург : Питер, 2010. – 350 с.

31. Запенин, В. И. Расчёт жёсткого натяжного устройства ленточного конвейера / В. И. Запенин, М. А. Гладких // Шахтный и карьерный транспорт. Вып. 2 / под общ. ред. А. О. Спиваковского. – Москва : Недра, 1975. – С. 53–58.

32. Дьяков, В. А. Транспортные машины и комплексы открытых разработок. – Москва : Недра, 1986. – 344 с.

33. Подпорин, Т. Ф. Исследование влияния разгона бремсбергового ленточного конвейера на характеристики торможения // Механизация горных работ : сб. науч. тр. / Кузбас. политехн. ин-т. – Кемерово, 1986. – С. 127–132.

34. ОСТ 12.14.130-79. Конвейеры ленточные шахтные. Методика расчёта / Минуглепром СССР : Введ. 01.01.1981. – Москва, 1980. – 71 с.

35. Галкин, В. И. Транспортные машины : учеб. для вузов / В. И. Галкин, Е. Е. Шешко. – Москва : Горная книга, МГТУ, 2010. – 588 с.

36. Кашеев, И. И. Исследование тормозных режимов мощных ленточных конвейеров открытых горных разработок : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1968. – 16 с.

37. Шахмейстер, Л. Г. Расчёт ленточных конвейеров для шахт и карьеров / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев. – Москва : Изд-во МГИ, 1972. – 293 с.

38. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий [Электронный ресурс] : учеб. пособие для студентов вузов / В. И. Галкин [и др.]. – Москва : Горная книга, 2011. – 544 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/69815/> (дата обращения 22.12.2016).

39. Подпорин, Т. Ф. К вопросу об уточнении значения агрегатной жёсткости ленты ленточного конвейера // Совершенствование технологических процессов при разработке месторождений полезных ископаемых : сб. науч. тр. № 8. – Кемерово, 1994. – С. 79–95.

40. Соппротивление материалов / под ред. Г. С. Писаренко. – 5-е изд., перераб. и доп. – Киев : Вища шк. ; Головное изд-во, 1986. – 775 с.

41. Проектирование и конструирование транспортных машин и комплексов / под общей ред. проф. И. Г. Штокмана. – Москва : Недра, 1986. – 392 с.

42. Горнотранспортное оборудование. Разд. 3. Конвейеры подземные ленточные. – Москва : Центрогипрошахт, 1990. – 255 с.

43. Вычислительная техника в инженерных и экономических расчётах : учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / А. В. Петров [и др.] : под ред. А. В. Петрова. – Москва : Высш. шк., 1984. – 320 с.

44. Ещин, Е. К. Работа на персональных ЭВМ «Искра-1256»



(Практика общения) / Е. К. Ещин, М. А. Тынкевич, Б. А. Денискин, В. Г. Левин. – Кемерово : Кемеровское кн. изд-во, 1987. – 152 с.

45. Подпорин, Т. Ф. Моделирование переходных режимов ленточных конвейеров : учеб. пособие : в 2 ч. / ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2002. – Ч. 1: Моделирование процессов изменения натяжения ленты при разгрузке и загрузке конвейеров. – 164 с.

46. Правила безопасности в угольных шахтах. – Документ предоставлен КонсультантПлюс Дата сохранения: 11.03.2014. [http://inoteh-prk.ru/docs/pravo/pb\\_um.pdf](http://inoteh-prk.ru/docs/pravo/pb_um.pdf) (дата обращения 22.08.2015).

47. Правила технической эксплуатации ленточных конвейеров на предприятиях чёрной металлургии. – Москва : Металлургия, 1987. – 103 с.

48. Обеспечение надёжности асинхронных двигателей / П. И. Захарченко, И. Г. Ширнин, Б. Н. Ванеев, В. М. Гостищев. – Донецк : Изд-во УкрНИИВЭ, 1998. – 324 с.

49. Основные положения по проектированию подземного транспорта для новых и действующих угольных шахт. – Москва : ИГД им. А. А. Скочинского, 1986. – 355 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Ленточный конвейер (конвейерная установка) – сложная электромеханическая система	5
1.1. Общие сведения	5
1.2. Механические характеристики. Переходные режимы	11
1.3. Уравнение динамического равновесия	23
1.4. Тяговые характеристики	26
1.5. Уравнение движения	31
1.6. Влияние динамических составляющих натяжения ленты на сцепление её с приводным барабаном	37
1.6.1. Особенности режима пуска	37
1.6.2. Особенности режима торможения	40
2. Моделирование процесса изменения натяжения ленты при разгрузке и загрузке конвейера	47
2.1. Жёсткость ленты	48
2.2. Конвейеры для транспортирования груза по уклонам и горизонтальным трассам (программа <i>GAMMA</i> )	59
2.2.1. Разгрузка конвейера. Исходные уравнения	59
2.2.2. Загрузка конвейера. Исходные уравнения	68
2.2.3. Методы вычисления интегралов и решения алгебраических уравнений	71
2.2.4. Подынтегральные функции и контрольные зависимости без учёта провеса ленты между роlikоопорами	72
2.2.5. Подынтегральные функции и контрольные зависимости с учётом провеса ленты	75
2.2.6. Подынтегральные функции и контрольные зависимости с учётом уточнения провеса ленты	81
2.2.7. Тяговый расчёт	87
2.2.8. Методика определения действительного корня уравнения и контрольного натяжения ленты конвейера	101
2.2.9. Результаты моделирования натяжения ленты в переходных режимах	107
Заключение	115

Приложения		120
Приложение 1	Кейс № 1	120
Приложение 2	Кейс № 2	124
Приложение 3	Кейс № 3	129
Приложение 4	Кейс № 4	132
Приложение 5	Кейс № 5	134
Приложение 6	Исходные данные для вычисления по программе <i>ГАММА</i>	139
Приложение 7	Результаты вычисления по программе <i>ГАММА</i> уклонного конвейера 2ЛУ120	139
Приложение 8	Имитационно-игровое моделирование	146
Приложение 9	Презентация	149
Приложение 10	Моделирование производственной си- туации	151
Приложение 11	Моделирование производственного процесса	153
Список использованной литературы		156

Подпорин Тимофей Федосеевич

ТРАНСПОРТНЫЕ МАШИНЫ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ  
ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Учебное пособие

Редактор З. М. Савина

Подписано в печать 30.03.2017. Формат 60×84/16  
Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman». Уч.-изд. л. 10,00  
Тираж 100 экз. Заказ

КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28

Издательский центр УИП КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А

---