

М 338372

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ
ИМЕНИ Н. Э. БАУМАНА

На правах рукописи

ПЕРТЕН
Юрий Александрович

**ТЕОРИЯ, КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ
КРУТОНАКЛОННЫХ И ВЕРТИКАЛЬНЫХ
КОНВЕЙЕРОВ**

(Специальность: 05.05.05 — подъемно-
транспортные машины)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва
1979

Работа выполнена на кафедре Детали машин и подъемно-транспортные машины завода-ВТУЗа при дважды ордена Ленина и ордена Октябрьской революции производственном объединении турбостроения «Ленинградский Металлический завод».

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор *Вайнсон А. А.*
(Московский инженерно-строительный институт)

доктор технических наук, профессор *Петров Г. Н.*
(МВТУ им. Н. Э. Баумана)

доктор технических наук, профессор *Зенков Р. Л.*
(Всесоюзный заочный политехнический институт)

Ведущая организация — Всесоюзный научно-исследовательский институт подъемно-транспортного машиностроения (ВНИИПТМаш).

Защита состоится « » _____ 1979 г. на заседании специализированного Ученого Совета по машиностроению Д 053.10.06 Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища им. Н. Э. Баумана, 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., дом. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ.

Авт

спе
д

ОЧАРОВ Н. Ф.

М 338372

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО
ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ им. Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

ПЕРТЕН Юрий Александрович

ТЕОРИЯ, КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ
КРУТОНАКЛОННЫХ И ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

М 338372.90 /Специальность: 05.05.05 - подъемно-транспортные машины/

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана

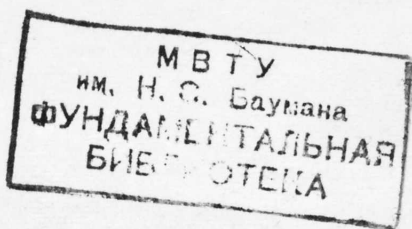


1338372

Пертен Ю.А. Теория, констр

Москва

1979



9.02.79. М-26066 Типография ЛДНП, Ленинград, Невский пр., 58
Зак. № 247 Тираж 150 экз. Объем 1,5 печ.л. Бесплатно

Общая характеристика диссертационной работы

Актуальность проблемы. Решениями XXV съезда КПСС намечена обширная программа развития народного хозяйства СССР на основе комплексной механизации и автоматизации производственных процессов. Интенсивный рост объема производства массовых насыпных и штучных грузов, исчисляемый миллиардами тонн, требует разработки и создания высокоэффективного конвейерного транспорта, развитие которого сдерживается техническими возможностями обычных ленточных конвейеров, позволяющих транспортировать насыпные грузы при углах наклона не более $18-20^{\circ}$, и отсутствием высокопроизводительных конвейеров для вертикального перемещения штучных грузов. Применяемые в промышленности для крутонаклонного и вертикального транспортирования скребковые конвейеры и элеваторы по производительности, степени автоматизации и другим показателям не отвечают всем требованиям современного производства. Таким образом, разработка и создание новых конструкций крутонаклонных и вертикальных конвейеров является актуальной научной проблемой, имеющей большое народно-хозяйственное значение.

Цель исследования. Целью диссертационной работы является выявление основных закономерностей и разработка теоретических основ процессов крутонаклонного и вертикального перемещения грузов, установление оптимальных рабочих параметров, разработка методов расчета и создание на базе полученных результатов новых конструкций высокопроизводительных крутонаклонных и вертикальных конвейеров для транспортирования насыпных и штучных грузов.

Методы исследования. Основными методами исследования являются: теоретические исследования с установлением основных закономерностей процессов крутонаклонного и вертикального перемещения; экспериментальные исследования с использованием современных технических средств; анализ и обобщение полученных результатов с установлением рациональных диапазонов рабочих параметров высокопроизводительных крутонаклонных и вертикальных конвейеров.

Научная новизна. Автором выявлены основные закономерности, разработаны теоретические основы и методы расчета круто-

наклонного и вертикального перемещения грузов, установлены оптимальные значения рабочих параметров и определены основные принципы создания высокопроизводительных конвейеров, являющихся новым перспективным направлением в развитии машин непрерывного транспорта.

Практическая ценность. Теоретические основы и базирующиеся на них методы расчета нашли широкое применение при проектировании и конструировании крутонаклонных и вертикальных конвейерных систем на заводах, в КБ, проектных и научно-исследовательских организациях. Результатом выполненных исследований явилась разработка новых способов и конструктивных решений, более тридцати из которых защищены авторскими свидетельствами. Создание и внедрение серий принципиально новых крутонаклонных и вертикальных конвейерных систем на предприятиях машиностроительной, радиотехнической, горной, пищевой и других отраслей народного хозяйства показало их высокую технико-экономическую эффективность.

Апробация работы. По материалам диссертации сделаны и одобрены доклады и сообщения на международной научно-технической конференции по подъемно-транспортным машинам и системам, НРБ, Варна, 1976 г., на международной научно-технической конференции по ПТМ, ГДР, Лейпциг, 1974 г., на всесоюзных НТК по механизации и автоматизации транспортных, складских и погрузочно-разгрузочных работ, Ленинград, 1962 г.; Волгоград, 1962 г.; Киев, 1963 г.; Москва, 1974 г.; Гомель, 1978г.; на всесоюзной НТК "Прогрессивные конструкции конвейерных машин для насыпных грузов", Ленинград, 1967 г., на НТК "Вертикальные и крутонаклонные конвейеры для транспортирования грузов в промышленности", Ленинград, 1971 г., на научно-технической конференции и семинарах по конвейерному транспорту, Ленинград, 1965-1979 гг.; Москва, 1967, 1971, 1972, 1974; Харьков, 1969; Кишинев, 1976; Смоленск, 1969, на НТК "Поточно-транспортные конвейерные системы и АСУ", Ленинград, 1977, на научно-технических и Ученых Советах заводов и вузов.

Публикация. По результатам работы опубликовано 76 научных трудов, в том числе две монографии и 38 авторских свидетельств.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения.

Объем работы - 254 страницы машинописного текста, 106 рисунков, список литературы 208 наименований и приложение на 100 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Анализ состояния проблемы и постановка задач исследований

Одним из наиболее прогрессивных способов перемещения массовых насыпных и штучных грузов является конвейерный транспорт, удельный вес которого в промышленном транспорте к 1980 году должен составить свыше 30 %, а объем перерабатываемых грузов достигнет 15+20 млрд. тонн.

Обширный диапазон сфер применения крутонаклонных и вертикальных конвейеров в различных отраслях промышленности, трудности теоретической разработки, создания и внедрения новых типов конвейерных систем обусловили необходимость постановки и решения данной проблемы с участием ведущих научно-исследовательских институтов, проектных и производственных организаций как в нашей стране, так и за рубежом.

Большой вклад в развитие подъемно-транспортных машин внесли труды коллективов ученых ВНИИПТМАШ, МВТУ им. Баумана, ЛПИ им. Калинина, ЛИВТа, ВЗПИ, УПИ, МИСИ и других вузов, научно-исследовательских и проектных организаций, и в частности, монографии и работы М.П.Александрова, А.А.Вайнсона, М.М. Гохберга, А.И.Дукельского, И.П.Крутикова, С.А.Казака, А.Б. Парницкого, П.З.Петухова, Н.Ф.Руденко, Б.А.Таубера и др.

Важную роль для развития конвейерного транспорта сыграли многочисленные работы научно-исследовательских и проектно-конструкторских институтов: ВНИИПТМАШ, ИГД им. Скочинского, ГТИ Союзпроммеханизация; Вузов - МГИ, ДГИ и др., а также работы отдельных ученых и исследователей в области конвейерного транспорта: П.С.Козьмина, Н.С.Полякова, А.О.Спиваковского, А.А.Долголенко, Р.Л.Зенкова, И.Г.Штокмана, Л.Г.Шахмейстера, А.В.Андреева, Н.Я.Емиченко, И.И.Ивашкова, А.В.Евневича, Г.И.Солода, В.Н.Потураева, В.К.Дьячкова, Л.Н.Колобова, И.Ф. Гончаревича, В.А.Дьякова, Е.Е.Шешко, И.Бара, Г.Пайера и др.

В последнее десятилетие созданию крутонаклонного и вертикального конвейерного транспорта посвящены работы ВНИИПТМАШа, УкрНИИпроекта, ИГД им. А.А.Скочинского, МГИ, ВНИИЗемМаша, ВНИИНеруда, ИГД МЧМ СССР, ИГТМ АН УССР и других организаций в Советском Союзе, а также многих объединений и фирм социалистических и капиталистических стран. Однако эта проблема имеет еще много нерешенных задач, связанных с теорией, расчетом и проектированием крутонаклонных и вертикальных конвейеров.

Решение поставленной проблемы потребовало научного рассмотрения целого ряда задач, совокупность которых определила как общую постановку вопроса, так и методику проведения исследований. Основные задачи решаемой проблемы могут быть сформулированы следующим образом.

1. Анализ состояния проблемы, систематизации и классификации высокопроизводительных крутонаклонных и вертикальных конвейеров по конструктивным и функциональным признакам, обоснование принятого метода исследований с установлением целевой функции и ограничений.

2. Изучение физических основ процесса крутонаклонного и вертикального транспортирования груза и уточнение закономерностей механики насыпных грузов, применительно к специфическим условиям их перемещения крутонаклонными и вертикальными конвейерами.

3. Определение основных закономерностей процессов крутонаклонного и вертикального транспортирования и разработка основ теории крутонаклонных и вертикальных конвейеров для перемещения насыпных и штучных грузов: исследование напряженного состояния системы "транспортируемый груз - конвейерная лента"; определение нагрузок, возникающих при движении ленты с напряженно-деформированным насыпным грузом, и установление закономерности распределения вертикального и бокового давления; определение максимально-допустимых и оптимальных углов наклона конвейеров, реализующих различные способы удержания груза на грузонесущем полотне; исследование динамики процесса транспортирования груза ленточно-цепными крутонаклонными и четырехцепными вертикальными конвейерами; определение закономерности распределения нагрузки между тяговыми и

грузонесущими элементами конвейеров; определение производительности, сопротивления движению, тягового усилия и мощности привода крутонаклонных и вертикальных конвейеров.

4. Экспериментальные исследования процессов транспортирования грузов крутонаклонными и вертикальными конвейерами на специальных стендах и опытно-промышленных установках с целью проверки и уточнения результатов теоретических исследований: изучение физико-механических свойств транспортируемых грузов и определение основных закономерностей их напряженно-деформированного состояния; определение оптимальных конструктивных и эксплуатационных параметров крутонаклонных и вертикальных конвейеров в зависимости от угла наклона, скорости движения и физико-механических свойств транспортируемых грузов; исследование закономерности распределения тяговых и несущих функций в ленточно-цепных и четырехцепных конвейерах; исследование закономерностей распределения вертикального и бокового давления насыпного груза в двухленточных, трубчатых и подвесных крутонаклонных и вертикальных конвейерах.

5. Обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований, определение качественных и количественных характеристик процессов транспортирования в соответствии с принятыми критериями и ограничениями и разработка методов расчета новых типов высокопроизводительных крутонаклонных и вертикальных конвейеров.

6. Практическое применение результатов исследования и обоснование технико-экономической эффективности внедрения высокопроизводительных крутонаклонных и вертикальных конвейеров в различных отраслях промышленности.

В первой главе дается аналитический обзор материалов, касающихся современного состояния и перспектив развития конвейерного транспорта для крутонаклонного и вертикального перемещения грузов.

Систематизация и анализ работы различных типов конвейеров позволили установить, что крутонаклонные и вертикальные конвейеры наиболее целесообразно классифицировать по конструктивным и функциональным признакам устройств, удерживающих груз на грузонесущем элементе.

Технико-экономический анализ различных типов конвейеров показал, что наиболее перспективными для крутонаклонного и вертикального перемещения грузов являются: конвейеры со

специальными лентами, ленточно-цепные, двухленточные, трубчатые, конвейеры с подвесной лентой, конвейеры-накопители и четырехцепные вертикальные конвейеры. Для установления рациональных диапазонов рабочих параметров принят экономический критерий $\Sigma_{уд} \frac{p_{уб}}{t_m}$; при этом целевая функция имеет вид:

$$\Sigma_{уд} = \phi[\tau, \sigma, K_n, K_g, \rho, f, \gamma, \beta, Q, v, K_t, M_g(t)] - \min(I)$$

где σ - нормальные напряжения, действующие на элементарных площадках рассматриваемого сыпного груза; τ - касательные напряжения действующие на тех же площадках; K_n - коэффициент подвижности сыпного груза характеризующий минимальное значение бокового давления, при котором происходит перемещение частиц; K_g - коэффициент бокового давления характеризующий распределяющую способность сыпного груза; ρ - угол внутреннего трения сыпного груза в процессе перемещения; β - угол наклона конвейера; f - коэффициент трения груза по поверхности контакта с грузонесущим элементом; γ - объемная масса сыпного груза; $M_g(t)$ - момент двигателя; v - скорость транспортирования; Q - производительность конвейера; ρ - давление сыпного груза; K_t - коэффициент параметров трассы.

Ограничения по рабочим параметрам конвейеров (табл. I) определены в соответствии с принятой классификацией, включающей пять основных групп:

Таблица I

Группы конвейеров	Ограничения по параметрам			
	$Q_{гф} \geq [Q_{гф}]$ т/час	$\beta_{гф} \geq [\beta_{гф}]$ град	$v_{гф} \geq [v_{гф}]$ м/сек	$K_{тгф} \geq [K_{тгф}]$
I	200+1000	20+35	1,5+5,0	0,34+0,57
II	100+500	30+60	0,5+2,0	0,50+0,86
III	150+2000	30+90	2,0+6,0	0,50+1,0
IV	100+300	45+90	1,0+3,0	0,71+1,0
V	100+1500	60+90	0,2+1,0	0,86+1,0

Принятые ограничения позволяют в процессе исследований учесть все конструктивные особенности рассматриваемых типов конвейеров, физико-механические свойства транспортируемых грузов и транспортно-технологические характеристики анализируемых процессов.

2. Теоретические исследования процессов транспортирования грузов крутонаклонными и вертикальными конвейерами

Результаты теоретических исследований, приведенные во второй главе, освещают физические основы процессов транспортирования насыпных и штучных грузов и устанавливают основные закономерности, определяющие работу исследуемых типов конвейеров в оптимальных режимах.

При транспортировании насыпных грузов устойчивость процесса устанавливается условиями равновесного состояния груза под действием объемных и граничных сил, которые определяются уравнениями равновесия сыпучей среды

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + F_x &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + F_y &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

а также граничными условиями на поверхности внутренних срезов $\tau/\sigma = f_0$, поверхности контакта с грузонесущими элементами $\tau/\sigma = f$, и свободной поверхности насыпного груза $\sigma = 0$; $\tau = 0$, где F_x, F_y - интенсивность объемных сил; f_0, f - коэффициенты внутреннего трения и трения груза о ленту.

Принятым при исследовании крутонаклонных конвейеров грузам наиболее полно отвечает модель связанного насыпного груза, которая определяется зависимостью

$$\phi(\sigma) = \begin{cases} \tau_0 + f_0 \sigma & \text{при } \sigma > \sigma' \\ (2\tau_0 - \sigma^2)^{1/2} & \text{при } \sigma < \sigma' \end{cases}, \quad (3)$$

где τ_0 - начальное сопротивление сдвигу; τ - радиус предельного круга напряжений; σ и σ' - нормальные напряжения.

Если напряженное состояние груза окажется внутри области

допредельного состояния, то для решения задачи следует рассмотреть процесс формирования напряженного состояния. Нормальные напряжения на взаимноперпендикулярных площадках σ_1 и σ_3 должны удовлетворять

$$|\sigma_1 - \sigma_3| \leq \frac{f}{\sqrt{1+f^2}} \left(\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \frac{\tau_0}{f} \right) \quad (4)$$

Исследование особенностей работы конвейеров со специальными лентами связано в первую очередь с определением закономерностей распределения давления насыпного груза на ленту и удерживающие элементы. Используя уравнения равновесия насыпного груза определим нормальные и касательные напряжения для плоскости, наклоненной под углом ψ к оси X , проходящей вдоль поверхности насыпного груза

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_x \cos^2 \psi + \sigma_y \sin^2 \psi + 2\tau_{xy} \sin \psi \cos \psi \\ \tau &= (\sigma_x - \sigma_y) \sin \psi \cos \psi + \tau_{xy} (\sin^2 \psi - \cos^2 \psi) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Нормальные напряжения на ленте конвейера, образующей с осью OX угол, равный $\beta - \rho$ с учетом значения σ_y и τ_{xy} будут

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \tau_y \cos \rho}{2} + \frac{\sigma_x - \tau_y \cos \rho}{2} \cos 2(\beta - \rho) + \tau_y \sin \rho \sin 2(\beta - \rho).$$

Нормальные напряжения на перегородке, образующей с осью OX угол $\frac{\alpha}{2} + \beta - \rho$ равны

$$\sigma_n = \frac{\sigma_x + \tau_y \cos \rho}{2} - \frac{\sigma_x - \tau_y \cos \rho}{2} \cos 2(\beta - \rho) - \tau_y \sin \rho \sin 2(\beta - \rho).$$

Результирующие силы давления на ленту и перегородку определяются выражениями:

$$P_1 = \int_{(s)} \sigma_1 dS = \int_0^{h \cos(\beta - \rho)} \sigma_1 \frac{dy}{\sin(\beta - \rho)} \quad (6)$$

и перегородку

$$P_n = \int_{(s)} \sigma_n dS = \int_0^{h \cos(\beta - \rho)} \sigma_n \frac{dy}{\cos(\beta - \rho)} \quad (7)$$

Производительность ленточных конвейеров, работающих под углами наклона, превышающими угол откоса транспортируемого материала определяется объемом насыпного груза, расположенного между перегородками

$$V = \operatorname{ctg}(\beta - \rho_0) \left[\int_0^a P_1 dx + \int_a^{a + b \operatorname{ctg} \alpha} P_2 dx \right], \quad (8)$$

где P_1 и P_2 - величины, зависящие от конструктивных особенностей грузонесущих элементов.

Ленточно-цепные конвейеры по конструктивному исполнению подразделяются на конвейеры с лентой, свободно лежащей на опорных пластинах цепного тягового органа, и приводимой в движение за счет фрикционной связи; конвейеры с двумя тяговыми органами; конвейеры с тяговой цепью, лежащей на ленте, приводимой в движение за счет фрикционной связи с тяговым органом и транспортируемым грузом; конвейеры с двумя синхронно движущимися тяговыми органами и погруженными в верхний слой груза перегородками.

Условие устойчивой работы конвейера с приводной цепью при $F = L(q + q_1) \cos \beta f' K_c$ имеет вид

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{q + q_1}{q_n + q_u} \left[f' K_c - \left(\frac{q_n + q_u + q_p}{q + q_n} + 1 - K_c \right) \omega' \right] \quad (9)$$

В конвейере с двумя тяговыми органами устойчивость процесса обеспечивается требуемыми соотношениями движущих сил, передаваемых на груз лентой и цепью:

$$F_1 = q \Delta f' \cos \beta; \quad F_2 = q \Delta \sin \beta - F_1 \quad (10)$$

Ленточно-цепной конвейер с цепью, свободно-лежащей на ленте, приводится в движение силой, возникающей в результате трения цепи с перегородками и груза о ленту.

Для обеспечения движения ленты вместе с тяговым органом необходимо выполнение условия

$$f' \geq \omega' \left(1 + \frac{2q_1 + q_p + q_p}{q + q_u} \right) \quad (11)$$

В том случае, когда основная погонная нагрузка q_0 прижимается к несущему элементу конвейера дополнительной нагрузкой q_g условие равновесия имеет вид

$$q_0 \sin \beta - (q_0 + q_g) f' \cos \beta - K f_0 q_g \cos \beta = 0, \quad (12)$$

где K - коэффициент, учитывающий динамические воздействия на груз несущих элементов.

Динамические особенности работы ленточно-цепных конвейеров (рис. 1) определялись с учетом характеристик приводных двигателей, интенсивности рабочей нагрузки и кинематической неравномерности цепного привода. Дифференциальные уравнения движения ленточно-цепного конвейера имеют вид:

Решая уравнение системы и принимая $x_2(t)$ в виде $x_2(t) = \sum_{i=1}^m a_i \sin \frac{\omega_c t}{l}$, определяем динамику привода конвейера, воздействие привода на цепной рабочий орган и динамику цепей конвейера:

$$\varphi(t) = \frac{1}{R_2} \sum_{i=1}^m a_i \left(1 - \frac{\omega_c^2}{l^2 K_n^2}\right) \sin \frac{\omega_c t}{l} + \frac{n d g}{\rho K_n^2 R_2} \sin K_p t - \frac{A_2}{R_2} \sin K_2 t; \quad (14)$$

$$M_2(t) = \sum_{i=1}^m a_i \left[\left(\frac{C_n R_2}{g_n} - \frac{\omega_c^2}{l^2 R_2} \right) \left(1 - \frac{\omega_c^2}{l^2 K_n^2} \right) - \frac{C_n R_2}{g_n} \right] \sin \frac{\omega_c t}{l} + \frac{n d g}{\rho K_n^2} \left[\frac{C_n R_2}{g_n} - \frac{K_n^2}{R_2} \right] \sin K_p t + \frac{A_2 K_2^2}{R_2} \sin K_2 t. \quad (15)$$

Значения a_i определяются при $\frac{\partial u}{\partial t}(x, 0) = 0$; $\frac{dx_2}{dt}(0) = 0$; $\frac{d\varphi}{dt}(0) = 0$ в диапазоне $t \in [0; \frac{2\pi}{\omega_c}]$.

Продольная динамика цепи конвейера определяется выражением:

$$U(x, t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m a_i \sin \frac{\omega_c t}{l} + \frac{d g}{\rho K_p^2} \left(1 - \frac{n}{2}\right) \sin K_p t - \frac{2}{\rho} \sum_{j=1}^{\infty} \cos \frac{j \pi x}{\rho} \left\{ \omega_c^3 \rho \cos j \pi \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{l^3} \frac{1}{\frac{\omega_c^2}{l^2} - K_n^2 - \frac{j^2 \pi^2}{\rho^2}} \times \right. \\ \times \left(\frac{\rho}{j \pi K_n} \sin K_n \frac{j \pi}{\rho} t - \frac{l}{\omega_c} \sin \frac{\omega_c t}{l} \right) + \frac{d g K_p \left(\sum_{i=1}^n \cos \frac{j \pi x_i}{\rho} - \frac{1}{2} n \cos j \pi \right)}{K_p^2 - K_n^2 - \frac{j^2 \pi^2}{\rho^2}} \times \\ \times \left(\frac{\rho}{j \pi K_n} \sin K_n \frac{j \pi}{\rho} t - \frac{1}{K_p} \sin K_p t \right) \left. \right\}. \quad (16)$$

Анализ приведенных зависимостей показывает, что амплитуды динамических напряжений в цепи достигают максимума при условиях:

$$\frac{\omega_c}{l} = K_n \quad \frac{j \pi}{\rho} \quad \text{и} \quad K_p = K_n \quad \frac{j \pi}{\rho}.$$

Исследование динамики ленточно-цепных конвейеров на АБМ обусловлено сложностью исходной системы (I3), в которой наряду с обыкновенными дифференциальными уравнениями имеется волновое дифференциальное уравнение в частных производных, описывающее колебательные процессы в рабочем органе конвейера, который рассматривается, как упруго-вязкая среда с распределенными источниками возмущения по роlikоопорам и находящийся под воздействием кинематического возмущения. Решение на АБМ рассматриваемой системы осуществлялось методом дискретизации переменной X путем центральной конечно-разностной аппроксимации второго порядка:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{U(\rho_i + \rho_{i,p}) - 2U(\rho_i) + U(\rho_i - \rho_{i,p})}{\rho_{i,p}^2} = \frac{1}{\rho_{i,p}^2} [U_{(i-1)} - 2U_i + U_{(i+1)}], \quad (I7)$$

где U_i - значение искомой функции в соответствующих точках.

Анализ результатов исследований показал, что динамические нагрузки возникающие в результате возмущения от роlikоопор в (I,5+2) раза превосходят нагрузки имеющие место от кинематического возмущения, которые затухают по мере удаления от ведущей звездочки. Наиболее рациональными частотными диапазонами по шагу роlikоопор являются $\omega_p \leq (0,6+0,7)\omega_c$, что соответствует расстоянию между роliками $\rho_p = (0,8+1,4)m$; по кинематическому возмущению $\omega_k \gg (1,2+1,3)\omega_c$, т.е. работе в зарезонансной зоне.

При транспортировании двухленточными крутонаклонными конвейерами равновесие насыпного груза определяется уравнениями

$$\left. \begin{aligned} G_y &= P_0 + \gamma y \cos \beta; \\ \tau_{xy} &= \tau_{xy}^0 + \gamma y \sin \beta. \end{aligned} \right\} \quad (I8)$$

Условие отсутствия проскальзывания насыпного груза по поверхности лент имеет вид

$$\gamma h \sin \beta + \tau_{xy}^0 < f(P_0 + \gamma h \cos \beta) \quad (I9)$$

Исходя из "внутренней" устойчивости насыпного груза, равновесие его возможно, если

$$G_x^2 - 2G_x[(1+2f^2)G_y + 2f\tau_{xy}^0] + 4(1+f^2)\tau_{xy}^2 + G_y^2 - 4\tau_{xy}^2 - 4\tau_{xy}^0 G_y \leq 0.$$

Преобразуя это неравенство находим критическую толщину слоя

$$h_k = \frac{\tau_0 + p_0 (f_0 + f)}{\gamma (k_1 \sin \beta - f k_2 \cos \beta)} \quad (20)$$

При транспортировании штучного груза двухленточным конвейером он должен быть зажат основной и прижимной лентами и перемещаться без проскальзывания с их скоростью. Нормальное давление, при котором груз будет перемещаться без проскальзывания по лентам, определяется

$$N_{1(2)} \geq \frac{mg}{2} \left(\frac{\sin \beta}{f} \pm \cos \beta \right) \quad (21)$$

Если размер груза меньше шага роlikоопор, то в этом случае необходимое условие отсутствия сдвига груза относительно лент

$$\sum S_y f \geq G \sin \alpha \quad (22)$$

Определение осевого давления на криволинейном участке двухленточного конвейера производим, определяя приращение давления (рис. 2)

$$dP_p = dG - dT_1 - dT_2 - dT_3 \quad (23)$$

где в правой части представлены соответственно составляющие сил тяжести, сил трения о ленты от веса груза, бокового дав-

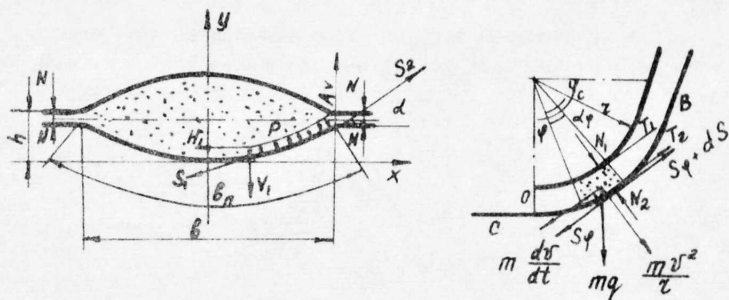


Рис. 2 Расчетная схема двухленточного конвейера

ления и центробежной силы инерции. Уравнение (23), с учетом подстановки выражения для составляющих сил, имеет вид:

$$\frac{dP_p}{d\beta} + \frac{K_g f L \eta P_p}{F} = g \delta F \eta \left[\sin \beta - f \cos \beta - \frac{f v^2}{\eta g} \right] \quad (24)$$

Решение уравнения (24) дает возможность определять закономерность распределения осевого давления на криволинейном участке.

При транспортировании насыпного груза трубчатым крутонаклонным конвейером удержание груза осуществляется за счет сил трения его о ленту и подпора нижележащим слоем. Уравнение равновесия элемента груза имеет вид

$$\frac{dT}{dS} = F_r - S_n mg \sin \beta, \quad (25)$$

где S - длина дуги; S_n - площадь поперечного сечения; F_r - сила трения.

В зависимости от способа формирования насыпного груза в трубчатой ленте возможны различные напряженные состояния, которые определяются неоднозначностью сил трения. Если транспортирование насыпного груза осуществляется без подпора со стороны нижележащих слоев, то критический диаметр определяется из соотношения

$$\left(\frac{S}{\ell} \right)_{кр} = \frac{\tau_0}{mg \eta}, \quad (26)$$

где ℓ - длина контура поперечного сечения; η - безразмерный коэффициент $\eta = \frac{1}{2}(\sqrt{1+f^2} - f^2)f^{-1} \sin \beta$.

При непрерывной загрузке крутонаклонного трубчатого конвейера минимальное усилие подпора нижележащими слоями будет

$$G_{min} = \frac{mg \sin \beta S_n (1-A)}{f \ell (1+A)} - \frac{2A}{1+A} G_0, \quad (27)$$

где $A = \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}; \quad G_0 = \frac{\tau_0}{f}.$

Для определения вертикального давления насыпного груза на нижележащие слои и бокового давления на ленту в вертикальном трубчатом конвейере решается дифференциальное уравнение

$$S\gamma dh + G_{cp}S = (G_{cp} + dG_{cp})S + G_{sf}L dh ,$$

где G_{cp} - среднее вертикальное давление по площади; S - площадь поперечного сечения; L - периметр сечения; G_{sf} - давление насыпного груза на ленту.

Усилие, развиваемое столбом насыпного груза и необходимая длина подпорного участка определяются

$$\rho = \frac{\pi \gamma d^2 K_j}{16 K_n f} ; \quad \rho = \frac{d K_j}{4 f^2 K_n} , \quad (28)$$

где d - диаметр трубчатой ленты; K_j - коэффициент динамичности.

При исследовании процесса транспортирования груза крутонаклонными конвейерами с подвесной лентой найдены уравнения, определяющие давление в насыпном грузе и натяжение ленты в зависимости от физико-механических свойств груза и угла наклона конвейера. Для определения оптимальной формы поперечного сечения ленты, при которой достигается максимальная производительность конвейера была составлена система уравнений

$$\left. \begin{aligned} T \cos \alpha - T_0 \cos \alpha_0 - \gamma \int_0^x h \sin \alpha ds &= 0 ; \\ T \sin \alpha - T_0 \sin \alpha_0 - \gamma \int_0^x h \cos \alpha ds &= 0 , \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

где T и T_0 - натяжение ленты; α и α_0 - углы между лентой и положительным направлением оси x ; ds - элемент длины поперечного сечения; h - высота слоя груза.

Расчеты показывают, что площадь поперечного сечения насыпного груза на подвесной ленте будет наибольшей при $\alpha_0 = 70^\circ$.

Значительное место в работе отводится теоретическому исследованию процесса транспортирования тарно-штучных грузов вертикальными конвейерами. Устойчивая работа четырехцепных вертикальных конвейеров используемых в автоматизированных транспортно-технологических системах обеспечивается при выполнении ряда требований, обусловленных как заданным режимом работы, так и конструктивными особенностями конвейеров.

В процессе подачи груза на конвейер для непрерывной и устойчивой работы взаимодействующих элементов, необходимо определить характеристики направляющих устройств при возмож-

ных отклонений груза и платформ вертикального конвейера.

Принимая координатные оси X, Y определим $\Delta X_c, \Delta Y_c$ - отклонение центра тяжести груза при наличии угла φ переко- са груза и значениях угла установки направляющих λ .

Исследование поведения груза при различных соотношениях исходных величин позволило определить оптимальные значения угла направляющих

$$\lambda = \begin{cases} \arccos\left\{\Delta y_c - \frac{1}{2}[\delta(\cos\varphi_0 - \cos\varphi_1) - a(\sin\varphi_0 - \sin\varphi)]\right\} / S_1 & \text{по } \varphi \\ \arcsin\left\{\frac{1}{2}[\delta(\sin\varphi_0 - \sin\varphi_1) + a(\cos\varphi_0 - \cos\varphi_1)]\right\} / S_1 & \text{по } \Delta X_c \end{cases} \quad (30)$$

и величину подачи S за период ориентации $S = S_1(\cos\lambda + \sin\lambda)$

Условия устойчивой работы четырехцепных вертикальных конвейеров в транспортно-технологических системах, потребо- вали выполнения динамического исследования с целью определе- ния силовых и кинематических характеристик, определяющих особенности работы конвейеров данного типа.

Динамика вертикальных четырехцепных конвейеров опреде- ляется особенностями технологических процессов, которые могут соответствовать повторно-кратковременному режиму работы, когда подход каждой платформы к фиксированному положению требует остановки системы или установившемуся режиму, когда переходные процессы при пуске и остановке не играют решающей роли и по длительности несоизмеримы по отношению к времени установившегося режима работы.

Расчетная схема системы представлена на рис. 3, где приняты следующие обозначения $C_1, C_2, \dots, C_n$ - жесткость участков цепи; $q_1, q_2, \dots, q_n$ - обобщенные координаты соот- ветствующих масс; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ - коэффициенты диссипации.

К числу активных сил, действующих на цепь относятся - тяговое усилие развиваемое двигателем $P_{дв}$ и кинематическое возмущение, обусловленное параметрами цепного привода, характеризуемое функцией положения преобразователя

$x = a_2 R \varphi + \frac{R \delta_2}{2} \sin 2\varphi$ и технологическая нагрузка от веса грузов G , представленная в виде импульсов с величиной Q , действующих с интервалами $T = \frac{S}{v}$, где S - расстояние меж- ду грузовыми платформами; v - скорость тяговых цепей.

Уравнения движения системы имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \gamma_n \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} &= R a_2 C_n (q_1 - a_2 R \varphi - \frac{R b_2}{z} \sin z \varphi) (1 + \frac{b_2}{a_2} \cos z \varphi) + M a(t) ; \\
 m_1 \cdot \frac{d^2 q_1}{dt^2} &= -C_n (q_1 - a_2 R \varphi - \frac{R b_2}{z} \sin z \varphi) + c_1 (q_2 - q_1) - c_6 (q_1 - q_6) ; \\
 m_2 \cdot \frac{d^2 q_2}{dt^2} &= c_2 (q_3 - q_2) - c_1 (q_2 - q_1) ; \\
 m_3 \cdot \frac{d^2 q_3}{dt^2} &= c_3 (q_4 - q_3) - c_2 (q_3 - q_2) ; \\
 m_4 \cdot \frac{d^2 q_4}{dt^2} &= c_4 (q_5 - q_4) - c_3 (q_4 - q_3) + Q_4 ; \\
 m_5 \cdot \frac{d^2 q_5}{dt^2} &= c_5 (q_6 - q_5) - c_4 (q_5 - q_4) + Q_5 ; \\
 m_6 \cdot \frac{d^2 q_6}{dt^2} &= c_6 (q_1 - q_6) - c_5 (q_6 - q_5) + Q_6 .
 \end{aligned} \tag{31}$$

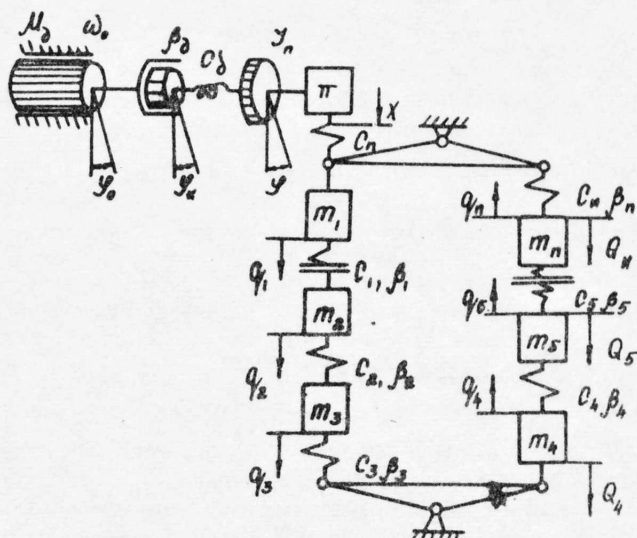


Рис. 3 Расчетная схема четырехцепного конвейера

Решая систему уравнений (31) с использованием преобразований Лапласа относительно $\ddot{q}_i(p)$, $\ddot{\varphi}(p)$, $M\ddot{a}(p)$ получим:

$$\begin{aligned}\ddot{q}_i(t) &= \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} \ddot{q}_i(p) e^{tp} dp; \\ \ddot{\varphi}(t) &= \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} \ddot{\varphi}(p) e^{tp} dp; \\ M\ddot{a}(t) &= \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} M\ddot{a}(p) e^{tp} dp.\end{aligned}\quad (32)$$

Амплитудные значения функций $\ddot{q}_i(t)$, $\ddot{\varphi}(t)$, $M\ddot{a}(t)$ зависят от параметров системы R , z , ω_0 , β_a , $C\delta$, M_{a0} , T , G .

При первом режиме нагружения груз с массой находится на платформе, вес груза передается на опорные элементы конвейера, цепь ослаблена, что соответствует наличию в системе зазора δ .

Динамические нагрузки, возникающие в рабочих ветвях цепей в момент окончания выборки зазоров определяются выражением:

$$P_g = \frac{m_2}{m_1 + m_2} P_{\delta\delta \max} \left(1 + \sqrt{1 + 4T^2 \frac{t_{\delta}^2}{T}} \right), \quad (33)$$

$$\text{где } t_{\delta} = \sqrt{\frac{2m_1\delta}{P_{\delta\delta \max}}}; \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m_1 m_2}{Cnp(m_1 + m_2)}} = \frac{2\pi}{K}$$

Окончание упругих деформаций цепей и переход к разгону системы характеризуется динамическими нагрузками

$$P_{g1} = Cnp \left[\sqrt{\frac{2\delta P_{\delta\delta \max}}{Cnp}} \sin p t_a + \frac{P_{\delta\delta \max}}{Cnp} (1 - \cos p t_a) \right], \quad (34)$$

$$\text{где } t_a = t_{\delta} + \frac{1}{p} \arccos \frac{P_{\delta\delta \max} - Q}{\sqrt{P_{\delta\delta \max}^2 + 2\delta Cnp P_{\delta\delta \max}}} \quad - \text{ время}$$

окончания упругих деформаций.

Динамические нагрузки в момент окончания разгона системы

$$P_{g2} = Cnp \left[A_2 \cos Kt + \frac{B_2}{p} \sin Kt + \frac{(P_{\delta\delta \max} - Q_2)}{K m_1 m_2} (1 - \cos Kt) \right], \quad (35)$$

где A_2 - упругие деформации системы в момент начала разгона; B_2 - начальная скорость при разгоне.

Исследование динамики четырехцепных вертикальных конвейеров проводилось с применением АВМ МН-14. Корректность математической модели обеспечивалась введением в систему приведенных значений жесткостей, диссипации, особенностей кинематического возмущения, а также сброса и наброса рабочей нагрузки,

полученных по результатам натурных испытаний. Анализ результатов исследований позволил определить оптимальные значения динамических нагрузок в тяговых и грузонесущих элементах четырехцепных вертикальных конвейеров. При этом частотные соотношения по кинематическому возмущению отвечают условию $\omega_k \gg (2,5+3) \omega_c$.

Фактические значения динамических нагрузок и деформаций, учет неравномерности распределения груза по платформе, а также возможные кинематические погрешности, вызванные неточностью монтажа и накопления отклонений по шагу цепи дадут возможность определить диапазон условий взаимодействия вертикальных четырехцепных конвейеров с элементами транспортно-технологических систем.

3. Экспериментальные исследования процессов транспортирования грузов крутонаклонными и вертикальными конвейерами

С целью проверки теоретических положений и правильного выбора основных параметров и конструктивных элементов крутонаклонных и вертикальных конвейеров автором были выполнены всесторонние экспериментальные исследования, результаты которых приведены в третьей главе. Принятая методика экспериментальных исследований предусматривала определение на натурных, опытно-промышленных установках качественных и количественных показателей исследуемых процессов, установление фактических режимов работы рассматриваемых конвейеров путем регистрации основных параметров с помощью комплексов современной аппаратуры и последующей обработки результатов измерений в соответствии с существующими научно-обоснованными рекомендациями. Исследования и промышленные испытания проводились на Ленинградском заводе РТИ, Пикалевском глиноземном комбинате, Московском МВС, объединениях "Воркутауголь" и "Ленинградский металлический завод", в аэропорту "Пулково" и др. промышленных объектах.

Экспериментальные установки позволяли транспортировать насыпные и штучные грузы в пределах углов наклона $15+90^\circ$, при скорости 0,5 - 5 м/с и производительности от 20 до 800 т/ч.

В результате проведения экспериментальных исследований определены физико-механические свойства насыпных грузов, использованных при исследовании крутонаклонных конвейеров, и найдены основные характеристики их напряженно-деформированного состояния. Установлено, что применение лент с выступами на рабочей поверхности является весьма эффективным для транспортирования мелкокусковых насыпных грузов, допустимые углы наклона конвейеров составляют $25 + 38^{\circ}$.

Крутонаклонные конвейеры, имеющие ленту с перегородками целесообразно применять при транспортировании насыпных грузов под углом наклона $30-50^{\circ}$.

В результате исследования ленточно-цепных конвейеров определены их оптимальные конструктивные параметры, установлена зависимость производительности и мощности двигателя от угла наклона конвейерной установки; найдена закономерность распределения тяговых и несущих функций между лентой и цепью.

Определены динамические нагрузки в цепном рабочем органе при непрерывном движении ленты, амплитудные значения которых составляют $P_{дин} = 450 + 500$ кгс, при частоте $f = 6,2 + 6,4$ 1/с.

Найдена закономерность распределения давления сыпного груза в двухленточных и ленточно-трубчатых крутонаклонных конвейерах; определена необходимая длина участка подпора, которая для устойчивого транспортирования сыпного груза составляет $1,4 + 2,5$ м в зависимости от угла наклона и длины конвейерной установки.

Установлены максимально-допустимые и оптимальные углы наклона конвейеров, реализующих различные способы удержания сыпного и штучного груза на грузонесущем полотне.

Определены оптимальные конструктивные параметры четырехцепных вертикальных конвейеров для штучных грузов. Установлены условия взаимодействия транспортно-перегрузочных устройств с платформами конвейера, выявлены предельные значения угла входа направляющих при возможных углах перекоса рабочей платформы и груза, и динамические особенности работы четырехцепных вертикальных конвейеров.

Использование современной регистрирующей аппаратуры, скоростной киносъемки и вычислительной техники для обработки результатов экспериментальных исследований, позволили получить

в эксперименте основные качественные и количественные характеристики процессов и проверить правильность исходных теоретических положений.

4. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований

Решение вопросов, связанных с определением оптимальных рабочих параметров процессов транспортирования грузов круто-наклонными и вертикальными конвейерами потребовало систематизации и обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Результаты выполненных теоретических исследований дали возможность произвести качественный и количественный анализ рассматриваемых систем, выявить функциональные связи, установить исходные параметры и критерии их оценки. В результате экспериментальных исследований были окончательно определены все основные характеристики процессов транспортирования грузов, которые в принятой постановке представлены в виде ограничений к классифицированным способам физической реализации процессов перемещения, установленных с учетом физико-механических свойств грузов, транспортно-технологических схем и конструктивных особенностей исследуемых конвейеров. Результаты такого анализа приводятся в четвертой главе работы.

Сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований конвейеров со специальными лентами позволил определить зоны их оптимальной работы в зависимости $Q(\beta)$ и рекомендовать допустимые углы наклона: рифленые ленты $\beta = 25 \pm 10^\circ$; ленты с перегородками $\beta = 30 \pm 50^\circ$.

Расчеты допустимого давления на выступы и их сравнение с результатами экспериментальных исследований позволили установить основные закономерности изменения объема V и результирующих сил давления на ленту P_L и перегородку P_n , оптимальные значения высоты и шага выступов при транспортировании различных по физико-механическим свойствам грузов. Так для мелкозернистых и мелкокусовых грузов $h = 8-12$ мм, для рядовых насыпных грузов $h = 12-20$ мм; рациональная скорость перемещения мелкозернистого груза составляет $2,0 \pm 4,0$ м/с и для рядового кускового насыпного груза - $1,2 \pm 1,8$ м/с.

Результаты теоретических исследований ленточно-цепных конвейеров определили условия работы при отсутствии взаимного проскальзывания грузонесущих элементов, что обеспечивается путем распределения общего тягового усилия между лентой и цепью пропорционально величине возникающих сопротивлений. В период установившейся работы конвейера экспериментальные значения сопротивлений движению цепи и ленты на 5-10 % меньше расчетных, что обусловлено уменьшением значения коэффициента сопротивления движению с повышением угла наклона. В результате экспериментов установлено, что истинная величина коэффициента сопротивления в крутонаклонных конвейерах ниже рекомендуемых в литературе для конвейеров обычного типа и составляет

$\omega' = 0,01 + 0,025$. Экспериментальные исследования дополнительно показали, что при выполнении лентой тяговых функций в пределах углов наклона конвейера до $35 + 40^\circ$ усилия в ленте превышают усилия в цепи. Установлено также, что в конвейерах с "неприводной лентой", работающих под углом наклона свыше 40° , при транспортировании таких материалов как щебень, происходит "всплывание" цепи на транспортируемый груз. При передаче тяговых усилий как лентой, так и цепью одновременно, явление "всплывания" цепи на груз не наблюдалось, что дает возможность рекомендовать этот тип привода при $\beta \geq 40^\circ$. Рациональные диапазоны скоростей ограничиваются максимально допустимыми для цепных передач ($v = 1,5 + 1,8$ м/с) и составляют $v = 0,8 + 1,2$ м/с. Рациональные формы и расположение перегородок, определяющие поперечное сечение транспортируемого материала уточнялись в процессе экспериментальных исследований на основании полученных закономерностей распределения сил давления груза на перегородку. В результате теоретических и экспериментальных исследований были определены частотные диапазоны и амплитудные значения нагрузок в цепях - $\omega_{кин} = (6,2 + 6,4) \text{ Ик}$, $P_{дин} = (1,2 + 1,4) P_{ст}$.

Теоретические исследования крутонаклонных двухленточных и трубчатых конвейеров позволили определить условия устойчивости насыпного груза и необходимую величину подпора. В процессе экспериментальных исследований были проверены теоретические зависимости и уточнены значения требуемого давления прижатия - q , допустимых углов наклона - β , предварительного натяжения ленты - S , а также условия транспортирования штучных грузов двухленточными конвейерами.

Отличительной особенностью четырехцепных вертикальных конвейеров является специфика тяговых расчетов, процессов автоматизированной перегрузки штучных грузов и динамический расчет нагрузок в рабочих участках цепей, связанный с различными условиями работы конвейеров и наличием кинематической неравномерности цепных передач. Выполненные исследования позволили установить условия перегрузки и оптимальные значения угла выравнивания φ на единицу длины направляющей, которые равны $\frac{\Delta\varphi}{\Delta L} = 0,5 \div 0,6$ град/сек, при крайних значениях $\frac{\Delta\varphi}{\Delta L} = 0,8 \div 0,47$ град/сек и значениях $\alpha = 17^\circ$, $\varphi_0 = 15^\circ$, $\Delta X_0 = 24,7$ см. Вследствие наличия кинематических зазоров в системе, упругое деформирование цепей происходит при значениях начальной скорости, вызывающей ударную нагрузку в грузонесущих элементах, поэтому их упругие деформации характеризуются амплитудными значениями нагрузок в $1,8 \div 2,0$ раза превышающими статистические, при этом теоретические значения частот собственных колебаний системы равны $P_{\text{теор}} = 16,5$ 1/с, а по результатам эксперимента $P_{\text{эксп}} = 15,5 \div 18,0$ 1/с.

Максимальные значения нагрузок в цепях имеют место при прохождении звездочек и превышают статические в $3,8 \div 4,2$ раза, что объясняется замкнутыми динамическими процессами, имеющими место при взаимодействии звеньев цепи со звездочкой.

Совместный анализ результатов выполненных теоретических и экспериментальных исследований подтвердил правомерность исходных физических концепций, положенных в основу теоретических исследований, показал достаточную сходимость полученных результатов и дал возможность определить рациональные значения рабочих параметров исследуемых типов крутонаклонных и вертикальных конвейеров.

5. Методы расчета высокопроизводительных крутонаклонных и вертикальных конвейеров

Конструктивные особенности и специфика процессов перемещения груза крутонаклонными и вертикальными конвейерами явились основанием для разработки принципиально новых теоретических положений и методов расчета, в основу которых положены результаты выполненных исследований.

С целью удобства практического применения результатов теоретических и экспериментальных исследований при проектировании крутонаклонных и вертикальных конвейеров построены номограммы, позволяющие определять все основные параметры подъемно-транспортных устройств данного класса: мощность двигателя, натяжные усилия в ленте и цепях, производительность и т.д. для различных условий эксплуатации и физико-механических свойств груза.

6. Разработка и промышленное внедрение высокопроизводительных крутонаклонных и вертикальных конвейеров

Результатом выполненных исследований явилась разработка новых способов и конструктивных решений, более 30 из которых защищены авторскими свидетельствами.

Разработанная методика проектирования и расчета высокопроизводительных крутонаклонных и вертикальных конвейеров одобрена решениями научно-технического координационного совещания по крутонаклонным ленточным конвейерам, Ленинградским межотраслевым НТС по комплексной механизации и автоматизации внутрицехового транспорта промышленных предприятий, прошла апробацию и используется в практической работе различных проектно-конструкторских организаций. С использованием этих разработок создано и внедрено в различных отраслях народного хозяйства значительное количество новых типов крутонаклонных и вертикальных конвейеров. В пятой главе приведены конструктивные особенности и технические характеристики новых типов конвейеров, указаны области внедрения и технико-экономическая эффективность. Крутонаклонные конвейеры со специальными лентами внедрены на Челябинском электрометаллургическом комбинате для технологического транспорта насыпных материалов, используются на роторном погрузчике, созданном институтом ВНИИСеммаш, а также широко применяются на складах минеральных удобрений, в химической, металлургической, пищевой и других отраслях народного хозяйства. Для ленточно-цепных конвейеров разработан типажный ряд, отдельные модели которого внедрены на строительстве метрополитена (КН-80), при проходке наклонных стволов (Леншестрострой); в объединении "Воркутауголь". шахта "Центральная" (КН-250); на судоремонт-

ном заводе "Красная кузница" и предприятиях строительных материалов. Двухленточные и трубчатые конвейеры внедрены в тресте "Уралдомнаремонт", на строительстве электростанций, Череповецком металлургическом комбинате, разработан герметизированный конвейер для транспортирования пылящихся насыпных грузов в металлургической промышленности. Вертикальные четырехцепные конвейеры для тарно-штучных грузов и конвейеры-накопители серийно выпускаются опытным заводом ЦПКБ нефтяной промышленности и опытным заводом ВПИЭлектро, в соответствии с разработанными типовыми рядами и внедрены в Ленинградском производственном объединении им. Козицкого, Московском МБЗ, объединении ВАЗ, в Ленинградских объединениях "Ижорский завод", "Оптико-механическое", "Адмиралтейское", "Электросила", в Ленинградском аэропорту "Пулково", Чебоксарском электроаппаратном заводе и других предприятиях различных министерств и ведомств.

Оптимальные рабочие параметры крутонаклонных и вертикальных конвейеров (рис. 4) определялись в соответствии с принятой целевой функцией по экономическому критерию $\varepsilon_{уд} \frac{руб}{тм}$. Выбор данного критерия позволил определить удельные экономические показатели, характеризующие эффективность работы исследуемых типов конвейеров

$$\varepsilon_{уд} = \varepsilon_{пр} / Q_f K_{тф} T_f . \quad (36)$$

Сравнительный анализ различных групп конвейеров для усредненных значений рабочих параметров по критерию удельных экономических затрат показывает, что по сравнению с обычными конвейерами удельные экономические затраты при транспортировании грузов конвейерами со специальными лентами ниже на (18-20) %, ленточно-цепные на (34-36) %, двухленточными на (38-40) %, трубчатыми на (50-52) % и четырехцепными на (58-60) %. Приведенный анализ свидетельствует о высокой экономической эффективности применения крутонаклонных и вертикальных конвейеров в народном хозяйстве. В работе рассматриваются основные показатели и примеры применения крутонаклонных и вертикальных конвейеров в машиностроительной, радиотехнической, угольной, пищевой и других отраслях промышленности.

Крутонаклонные и вертикальные конвейеры нашли широкое применение для транспортирования насыпных и штучных грузов - в литейном производстве машиностроительных заводов; для преодоления больших перепадов и загрузки доменных печей - в металлургической промышленности; для совершенствования транспортно-технологических схем - в химической, пищевой и приборостроительной промышленности, в качестве стационарных и

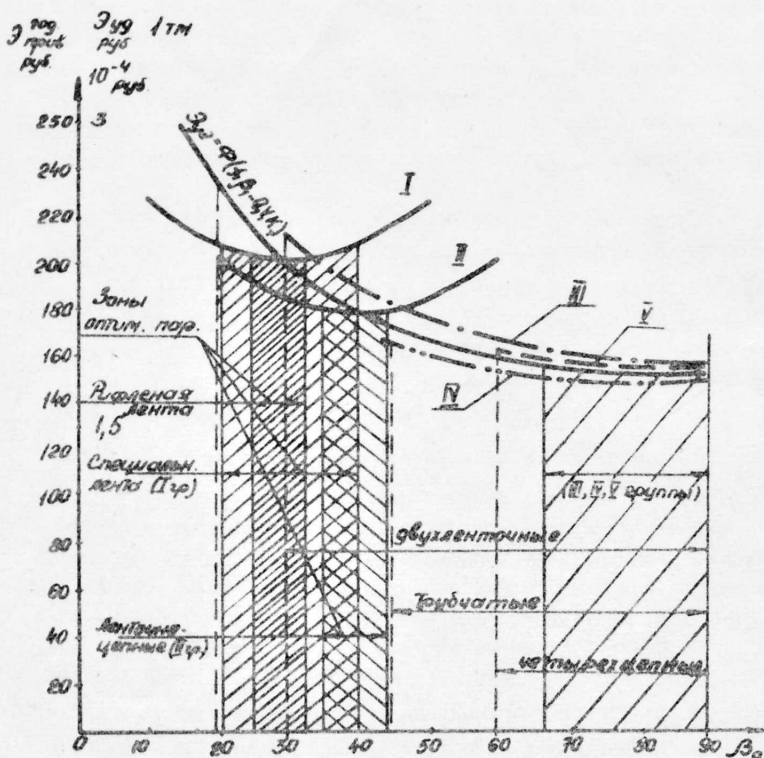


Рис. 4 К определению оптимальных параметров крутонаклонных и вертикальных конвейеров

передвижных транспортно-перегрузочных машин - в аэропортах, морских и речных портах, на перегрузочных базах и железнодорожных складах, в сельском хозяйстве; для установки в наклонных галереях - на теплоэлектростанциях, обогатительных фабриках и в строительстве; в качестве подъемных конвейерных установок - на шахтах и карьерах угольной промышленности и т.д.

Тенденции ряда отраслей к использованию многэтажных промышленных зданий и значительное увеличение глубины шахт и карьеров в угольной и горнорудной промышленности предопределяют исключительно большую перспективу применения вертикального и крутонаклонного конвейерного транспорта.

Экономический эффект применения вертикальных и крутонаклонных конвейеров в промышленности не ограничивается тем, что при заданной высоте подъема они дадут возможность уменьшить длину установки и снизить стоимость как самого конвейера, так и опорных конструкций, защитных галерей и др. Эффективность их применения заключается также в том, что они позволяют принципиально по-новому, наиболее экономично, решать транспортно-технологические схемы грузопотоков, значительно уменьшить объем работ, связанных с подготовкой места установки конвейера и эксплуатационные затраты на его обслуживание.

Результаты промышленной эксплуатации крутонаклонных и вертикальных конвейеров показали высокую технико-экономическую эффективность их использования в машиностроительной, радиотехнической, угольной, пищевой и других отраслях промышленности, что обеспечивается за счет снижения производительности труда и снижения себестоимости переработки насыпных и штучных грузов. Так, например, экономический эффект от внедрения разработанных крутонаклонных и вертикальных конвейеров по данным расчетов, выполненных предприятиями, составляет: объединение "Воркутауголь" около 100 тыс.руб., объединение им. Козицкого свыше 250 тыс.руб., Московский МВЗ около 500 тыс.руб.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Выполнено исследование, посвященное изучению процессов крутонаклонного и вертикального перемещения грузов, разработке теоретических основ и созданию на базе полученных результатов новых конструкций высокопроизводительных крутонаклонных и вертикальных конвейеров для транспортирования насыпных и штучных грузов.

1. Классификация крутонаклонных и вертикальных конвейеров выполнена в соответствии с принятыми классификационными признаками, основным из которых является способ удержания груза на грузонесущем полотне. Проведенный в работе сравнительный анализ позволил определить рациональные конструкции крутонаклонных и вертикальных конвейеров, реализующих все основные способы, и области их применения.

2. Использование системного подхода к решению поставленной проблемы дало возможность научно сформулировать цель и выбрать методы исследований, обеспечивающие корректное решение поставленных задач. Применение современных технических средств, аналоговых и цифровых вычислительных машин позволило с высокой точностью выполнить комплекс теоретических и экспериментальных исследований и получить данные, характеризующие особенности изучаемых процессов транспортирования.

3. Выявлены основные закономерности процессов крутонаклонного и вертикального транспортирования груза при неопределяемом равновесии сыпучей среды, находящейся под воздействием объемных и граничных сил, обусловленных действием пассивного и активного давления сыпучего груза на грузонесущие элементы конвейера; определены закономерности влияния изменения угла наклона на напряженно-деформированное состояние системы "транспортируемый груз - грузонесущие элементы"; установлены основные факторы, определяющие закономерности протекания динамических процессов в крутонаклонных и вертикальных конвейерах. На базе выявленных закономерностей разработаны теоретические основы процессов крутонаклонного и вертикального транспортирования насыпных и штучных грузов.

4. Исследовано взаимодействие груза с лентами крутонаклонных конвейеров, имеющими выступы и перегородки на рабочей поверхности; дано теоретическое обоснование процесса транспор-

тирования груза конвейером с рифленой лентой; установлена закономерность давления насыпного груза на ленту с перегородками от угла наклона конвейера и физико-механических свойств транспортируемого груза; получены зависимости для определения производительности и мощности привода крутонаклонных конвейеров со специальными лентами.

5. Разработаны основы теории и методы расчета ленточно-цепных крутонаклонных конвейеров: рассмотрены особенности тягового расчета и определения производительности; предложен и теоретически обоснован новый способ крутонаклонного транспортирования насыпных грузов; исследована закономерность распределения тяговых и несущих функций в ленточно-цепных конвейерах; выявлены динамические особенности работы и сформулированы требования к рабочим параметрам грузонесущих элементов.

6. Изучено напряженное состояние системы "транспортируемый груз - конвейерная лента" и установлены закономерности изменения пассивного и активного давления груза в двухленточных, трубчатых и подвесных конвейерах; получены уравнения равновесия насыпного и штучного груза; найдена закономерность распределения вертикального и бокового давления насыпного груза на прямолинейных и криволинейных участках; установлены оптимальные условия входа транспортируемого груза в рабочую зону и определены параметры, обеспечивающие максимальную производительность конвейеров.

7. Выполнен анализ работы вертикальных конвейеров для транспортирования штучных грузов; установлены условия взаимодействия транспортно-перегрузочных устройств с платформами конвейера при работе в автоматизированных системах; исследованы динамические режимы работы и определены нагрузки в тяговых элементах, возникающие как в период переходных процессов, так и в период установившегося режима работы.

8. В экспериментальной части работы изучены основные закономерности напряженно-деформированного состояния транспортируемого груза, установлены фактические значения динамических нагрузок, возникающих в рабочих органах и определены оптимальные значения конструктивных параметров различных типов крутонаклонных и вертикальных конвейеров.

9. Совместный анализ результатов выполненных теоретических и экспериментальных исследований подтвердил правомерность исходных физических концепций, положенных в основу теоретичес-

ких исследований, показал достаточную сходимость полученных результатов и дал возможность определить рациональные значения рабочих параметров исследуемых типов крутонаклонных и вертикальных конвейеров.

10. Разработанные аналитические и номограммные методы расчета базируются на результатах выполненных исследований, учитывают специфику процессов перемещения грузов и конструктивные особенности крутонаклонных и вертикальных конвейеров и дают возможность их практического применения при разработке и проектировании подъемно-транспортных устройств данного класса.

11. Результаты теоретических и экспериментальных исследований послужили основанием для разработки новых, более эффективных, по сравнению с применяемыми, способов перемещения груза, конструкций крутонаклонных и вертикальных конвейеров и устройств, защищенных авторскими свидетельствами.

12. Определены области рационального применения различных групп крутонаклонных и вертикальных конвейеров в народном хозяйстве страны. Внедрение крутонаклонных и вертикальных конвейеров в различных отраслях промышленности позволяет принципиально по новому, с большой технико-экономической эффективностью решать транспортно-технологические схемы грузопотоков, сокращать производственные площади и объемы, уменьшать длину транспортных галерей, снижать вес и стоимость конвейерных установок. Предполагаемая экономическая эффективность применения этих конвейеров только в машиностроительной, радиотехнической, угольной и пищевой промышленности составляет свыше 70 млн. руб.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ АВТОРА:

1. Исследование конвейеров с рифленой лентой. Сб. трудов. Вопросы рудничного транспорта, № 4, М., Госгортехиздат, 1960 (в соавтор. В.И.Геронтьев).

2. Определение производительности ленточных конвейеров, предназначенных для работы при крутых подъемах. Известия высших учебных заведений. М., Горный журнал, № 9, 1961.

3. Крутонаклонные ленточные конвейеры. Авторские свидетельства № 121374, 1959; № 196602, 1967; № 196603, 1967; № 249257, 1969; № 252174, 1969.

4. Предохранительное устройство против продольных разрывов конвейерной ленты. Авт.свид. № I22064, 1959.
5. Устройство для очистки ленты конвейера. Авт.свид. № I29I26, 1960.
6. Новый ленточный конвейер. М., Машиностроение, № IO, 1963.
7. Экспериментальное и теоретическое исследование ленточных конвейеров для больших углов наклона. Материалы всесоюзного совещания по ленточным конвейерам. М., ИГД АН СССР, 1960.
8. Новые конвейеры для горно-рудной металлургической и строительной промышленности. Материалы всесоюзного научно-технического совещания по ленточным конвейерам. М., ЦИТИ Угля, 1961.
9. Передвижной полочный элеватор. Авт.свид. № I66274, 1964.
10. Крутонаклонные ленточные конвейеры. М., ГОСИНТИ, 1965.
11. Наклонные конвейеры. М., Машиностроение, 1966.
12. Способ удержания насыпного груза на крутонаклонном конвейере. Авт.свид. № I9660I, 1967 (в соавт. А.С.Васильков).
13. Роликоопора для крутонаклонного ленточного конвейера со свернутой в трубу лентой. Авт.свид. № I98993, 1967.
14. Новые конструкции наклонных конвейеров и основы их расчета. М., НИИИНФОРМТЯМАШ, 1967.
15. Приводы крутонаклонных ленточных цепных конвейеров. Авт.свид. № 225766, 1968; № 227I60, 1968 (соавт. Гроховский Д.В.).
16. Теоретические и экспериментальные исследования крутонаклонных конвейеров для огнеупорной промышленности. Л. Труды ВЮ, № 40, 1968 (соавт. Гольдберг И.А., Черненко В.Д.).
17. К выбору рациональных передач для привода крутонаклонных конвейеров. Л. ЛДНТП, 1967 (соавт. Гроховский Д.В.).
18. Механизированные стеллажи элеваторного типа. Л., ЛДНТП, 1969.
19. Комплексная механизация и автоматизация транспортных и складских работ в радиотехнической и приборостроительной промышленности. Л., ЛДНТП, 1967.
20. Результаты теоретических и экспериментальных исследований новых наклонных конвейеров. Л., ЛДНТП, 1967.

21. Особенности расчета конвейеров для больших углов наклона. Л., Сб. докладов НТК СЗПИ, 1965.
22. Крутонаклонный ленточно-цепной конвейер. М., Уголь, 1971 (соавт. В.А.Гендон).
23. Определение динамических усилий в тяговой цепи крутонаклонного конвейера. Л., ЛДНТП, 1967 (соавт. А.Р.Ковалевский).
24. Некоторые вопросы исследования и внедрения крутонаклонных конвейеров. Л., ЛДНТП, 1971.
25. Основные проблемы развития вертикальных и крутонаклонных конвейеров. Материалы всесоюзной НТК "Вертикальные и крутонаклонные конвейеры для транспортирования грузов в промышленности". Л., ЛОСНТО, 1971.
26. Определение сопротивлений движению и тяговых усилий в ленточно-цепных крутонаклонных конвейерах. Л., Материалы НТК ЛОСНТО, 1971.
27. Исследование устойчивости сыпучего груза на полотне трубчатого крутонаклонного конвейера. Л., Материалы НТК ЛОСНТО, 1971 (соавт. В.Д.Черненко).
28. Экспериментальные исследования ленточно-цепного конвейера с перегородками. Л., Материалы НТК, ЛОСНТО, 1971.
29. Механизация и автоматизация складов штучных грузов. Л., Машиностроение, 1972.
30. Крутонаклонные конвейеры за рубежом. М., НИИИНФОРМТЯЖ-МАШ, 1973.
31. Вертикальные и крутонаклонные конвейеры. Л., ЛДНТП, 1973.
32. Основные результаты комплексных исследований разработки и внедрения крутонаклонных конвейеров. Л., ЛДНТП, 1973.
33. Крутонаклонные и вертикальные конвейеры. М., ЦНИИУголь, 1973 (соавт. Р.Л.Папоян, Р.И.Бабокина).
34. Крутонаклонные конвейеры. Специальные ленточные конвейеры за рубежом. М., НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1973, № 6-73-12, № 6-73-19.
35. Комплексная механизация и автоматизация внутрицехового транспорта на заводе им. Козицкого. Л., ЛДНТП, 1974 (соавт. В.Е.Велицкий).
36. Зарубежные конструкции вертикальных конвейеров для штучных грузов. М., НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1974.

37. Высокопроизводительные вертикальные конвейеры для крупногабаритных тяжелых тарно-штучных грузов. Л., ЛДНТП, 1974.
38. Комплексная механизация и автоматизация погрузочно-разгрузочных работ транспортных и складских. М., НИИИНФОРМТЯЖ-МАШ, 1974.
39. Эффективность применения крутонаклонных конвейеров в литейном производстве. Л., ЛДНТП, 1967.
40. Некоторые вопросы исследования и внедрения крутонаклонных конвейеров. Л., ЛДНТП, 1971.
41. Устройства для загрузки и разгрузки крутонаклонных конвейеров. Авт.свид. № 279421, 1970; № 1894776, 1971.
42. Опыт внедрения и особенности расчета новых вертикальных конвейеров. Труды НТК. М., МДНТП, 1974.
43. Крутонаклонные и вертикальные конвейеры. Ж. Механизация и автоматизация производства, № 7, М., 1975.
44. Вертикальный конвейер для транспортирования тарно-штучных грузов. Авт.свид. № 466157, 1975.
45. Результаты исследований и перспективы развития крутонаклонных конвейеров со специальными лентами. НТК, СДТ, Свердловск, 1975.
46. Высокопроизводительный вертикальный конвейерный транспорт. М., НТК, МДНТП, 1975.
47. Платформы вертикальных конвейеров. Авт.свид. № 514755, 1976; № 514756, 1976 (соавт. А.А.Янсон).
48. Вертикальный конвейер. Авт.свид. № 518424, 1976; № 518434, 1976; № 569490, 1977; № 589206, 1978; № 601200, 1978.
49. Исследование процесса автоматической перегрузки штучных грузов на вертикальный конвейер. Материалы НТС. Л., ЛДНТП, 1977 (соавт. А.А.Янсон, И.П.Жуков).
50. Новые автоматизированные системы горизонтально-вертикального перемещения штучных грузов. Материалы НТС "Поточно-транспортные системы с применением конвейерного транспорта и АСУ", Л., ЛДНТП, 1977.
51. Крутонаклонные конвейеры. Л., Машиностроение, 1977.
52. Крутонаклонные и вертикальные конвейерные системы. Труды международной НТК "Подъемно-транспортные машины и системы", НРБ, София, 1977.
53. Оптимальные рабочие параметры крутонаклонных и вертикальных конвейеров. Л., Материалы НТС, ЛДНТП, 1979.