

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГОРНАЯ АКАДЕМИЯ УКРАИНЫ

На правах рукописи

ТАТЬЯНЧЕНКО Александр Григорьевич

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ
ОТВАЛООБРАЗОВАТЕЛЕЙ РОТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Специальности:

05.05.06 — «Горные машины»,
01.02.06 — «Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВСК — 1993

ДВ 28049

Работа выполнена на кафедре сопротивления материалов Донецкого государственного технического университета

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
ШЕВЧЕНКО Ф.Л.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
КОЛОСОВ Л.В.

доктор технических наук, профессор
БЕЛОБРОВ В.И.

Ведущее предприятие - ПО Донецкгормаш

Защита состоится "22" 12 199 г. в 15.00 час. на заседании специализированного Совета К 068.08.04 в Государственной горной академии Украины (320600, ГСП, г.Днепропетровск-14, пр. Карла Маркса,19)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

Автореферат разослан "19" 11 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
доктор технических наук,
профессор

В.В.МИШИН

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00802869 (X)

ТВ - 20, 8-7-75

Актуальность работы. Основным направлением в разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом в нашей стране является расширение масштабов применения роторных экскавационно-транспортных комплексов непрерывного действия. Такие комплексы позволяют создавать полностью автоматизированные замкнутые технологические циклы разработки.

В странах СНГ накоплен большой опыт проектирования и эксплуатации комплексов непрерывного действия и, в частности, ленточных отвалообразователей, которые во многом определяют технологические возможности и эффективность таких комплексов. В настоящее время целый ряд машиностроительных заводов - Донецкий машиностроительный имени Ленинского комсомола Украины (ДМЗ), Новокраматорский машиностроительный (НКМЗ), "Азовмаш" (г. Мариуполь) и другие выпускают ленточные отвалообразователи с теоретической производительностью 1250-6750 м³/час и радиусом отсыпки транспортируемых пород до 190 м.

Основным техническим направлением совершенствования отечественных ленточных отвалообразователей является создание высокоманевренных (на рельсошагающем и шагающем ходу) машин, повышение их технологических возможностей и снижение металлоемкости. Наиболее актуальной является проблема рационального использования несущей способности *стреловых конструкций* отвалообразователя - *отвальной стрелы и приемной консоли*. Разрешению этой проблемы в последние годы способствовало использование вантовых систем, предварительно напряженных конструкций и неразрезных несущих элементов в стреловых конструкциях отвалообразователей.

Эти конструктивные и технологические решения позволили значительно облегчить отвальные консоли и снизить вес всей машины, однако отсутствие методов расчета таких конструкций применительно к отвалообразователям затрудняет проектные и конструкторские работы и приводит в отдельных случаях к нежелательным осложнениям и неудачным техническим решениям. Поэтому одной из основных задач дальнейшего снижения металлоемкости стреловых конструкций отвалообразователей является описание *напряженно-деформированного состояния* (НДС) с учетом геометрической нелинейности и динамики для однотипных конструкций и выработка единых алгоритмов их расчета на прочность.

Большой вклад в исследование НДС металлоконструкций отвалообразователей, в совершенствование расчетных моделей и разработку методик расчета на прочность вносят многие проектные институты и высшие учебные заведения. Однако в настоящее время по-прежнему являются недостаточно исследованными многие вопросы динамического нагружения металлоконструкций отвалообразователей, вопросы устойчивости длинных сжатых стержней и работы вантовых систем.

Решение этой проблемы осуществлялось в плане научных работ кафедр сопротивления материалов ДПИ в соответствии с решением технического Совета НИПТИУглегормаш (г. Донецк). В работе использованы результаты научных исследований, выполненных на кафедре сопротивления материалов по коздоговорам (номера госрегистрации тем 01850065741 и 01880045415).

Цель работы - совершенствование металлоконструкций отвалообразователей роторных комплексов на основе уточнения описания их напряженно-деформированного состояния и учета особенностей нагружения.

Идея работы заключается в исследовании напряженно-деформированного состояния металлоконструкций отвалообразователей как систем с распределенными параметрами в нелинейной постановке.

Научная новизна и результаты работы:

- исследовано НДС горизонтальной вантовой системы отвальной стрелы в линейной и нелинейной постановке; показана неправомерность использования в подобных расчетах принципа суперпозиции и необходимость учета собственного веса канатов; установлено, что предварительное натяжение канатам вантовой системы необходимо задавать не для обеспечения их "нераскрытия", а для создания достаточной жесткости конструкции;

- описано НДС отвальной стрелы по деформированной схеме; показано, что для отвальных стрел с неразрезным несущим элементом линейаризация расчетных схем оказывает влияние на положение опасных сечений, но при этом расчетные напряжения изменяются незначительно; разработан алгоритм расчета отвальных стрел по деформированной схеме, позволяющий определять рациональные геометрические параметры стрелы и снижать ее металлоемкость (для ОШ-1900 до 11%);

- разработаны алгоритмы расчета отвальных стрел на устойчивость, позволяющие учитывать ступенчато-переменную жесткость несущего стержня внутри пролетов; применительно к отвальным стрелам с неразрезным несущим элементом разработана инженерная методика определения первой формы потери устойчивости;

- дана оценка влияния на спектр собственных частот отвальных стрел различных допущений в расчетных схемах; показана необходимость учета действия продольной силы в несущем стержне; обоснована возможность увеличения скорости конвейера в 1,5 раза; предложена инженерная методика определения первой собственной частоты;

- исследовано НДС отвальной стрелы при шагании; показано, что на величину расчетных напряжений наибольшее влияние оказывают колебания несущего стержня, учет колебаний подвесных канатов и продольного сжатия несущего стержня практически не оказывает влияния на расчетные напряжения при существующих режимах шагания;

- методом конечных элементов рассчитано НДС приемной консоли и разработаны инженерные математические модели и методики их расчета при различных вариантах нагружения.

На защиту выносятся :

- основные зависимости, описывающие НДС горизонтальной вантовой системы отвальной стрелы, математическая модель и алгоритм расчета вантовых систем при коосимметричном нагружении, учитывающие нелинейность развития деформаций в гибких элементах;

- результаты исследования НДС отвальной стрелы при рабочем нагружении, математическая модель и алгоритм расчета стреловых вантовых конструкций по деформированной схеме, позволяющий определять рациональные геометрические параметры;

- динамическая математическая модель отвальной стрелы, отличающаяся возможностью учета колебаний подвесных канатов и продольного сжатия несущего стержня и результаты исследования спектра собственных частот по различным схемам;

- результаты исследования НДС отвальной стрелы при шагании, математическая модель процесса шагания и алгоритм расчета, позволяющий находить параметры для расчета металлоконструкций на прочность при шагании.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы подтверждается использованием при проведении исследований фундаментальных положений и методов строительной механики и динамики машин; строгой научной обоснованностью принятых допущений при разработке расчетных систем; хорошей сходимостью (до 16%) результатов теоретических и экспериментальных исследований по оценке параметров напряженно-деформированного состояния металлоконструкций ОШ-1900; удовлетворительной сходимостью результатов, полученных по предложенным методикам с результатами экспериментальных исследований на других моделях отвалообразователей (до 27%).

Научное значение работы заключается в описании НДС вантовых систем и стреловых конструкций в нелинейной постановке не только применительно к конструкциям отвалообразователей, но и к другим аналогичным конструкциям; создании научно обоснованных методик расчета НДС типовых металлоконструкций отвалообразователей.

Практическая ценность работы заключается в разработке и внедрении научно обоснованной методики инженерного расчета на прочность элементов конструкций отвалообразователей, позволяющей определять их рациональные геометрические параметры на стадии проектирования; создании пакета прикладных программ для исследования НДС отвальных стрел от различных видов статического и динамического внешнего воздействия.

Реализация результатов работы. Результаты исследований вошли в методику расчета силовых металлоконструкций машин роторных комплексов, внедрение которой в ПО Донецкгормаш в 1988 году при расчетах конструкций ОШ-1900 дало экономический эффект 487,6 тыс. рублей за счет снижения затрат на расчеты и снижения металлоемкости элементов отвалообразователей в результате уточнения НДС. Предложенная методика также была использована в ПО Донецкгормаш при проектировании новой модели межустановочного перегружателя в 1989 году. Программное обеспечение разработанной методики и других алгоритмов расчета сведено в пакет прикладных программ на языке FORTRAN, реализуется на ЭВМ типа ЕС-1060 и IBM PC AT и может быть использовано при создании САПР отвалообразователей.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на заседании Республиканского научно-методического семинара по сопротивлению материалов и строительной механике (г.Киев, КПИ, 1983 г.), научно-технической конференции Макеевского инженерно-строительного института (г.Макеевка, 1988 г.), IV Всесоюзной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов угольной промышленности СССР (г.Люберцы, 1989 г.), научно-технической конференции "Вклад молодых ученых и специалистов в научно-технический прогресс на современном этапе" (г.Севастополь, 1990 г.), научно-технической конференции "Проблемы повышения прочности и надежности элементов конструкций и приводов в машиностроении" (г.Севастополь, 1990 г.), научно-технических конференциях ДПИ (г.Донецк, 1988 г., 1991 г.), научных семинарах в ДПИ (1983 г.) и ГТАУ (1993 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ.

Объем работ. Диссертационная работа изложена на 194 страницах машинописного текста, содержит 89 рисунков и 49 таблиц, состоит из введения, шести глав, списка литературы, включающего 190 наименований, и приложений на 8 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

При разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом наиболее перспективным является использование комплексов непрерывного действия, в состав которых входят консольные отвалообразователи. В настоящее время производство отвалообразователей в нашей стране сосредоточено на трех основных заводах - "Азовмаш", НКМЗ и ДМЗ. Современные отечественные отвалообразователи традиционно имеют шагающие механизмы передвижения и отвальные стрелы с трубчатыми несущими элементами и вантовыми системами в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Вопросыми

совершенствования конструкций и методов расчета элементов отвалообразователей занимаются многие научные и учебные институты – УкрНИИпроект, МИСИ, УДН и другие. Большой вклад в решение этой проблемы внесли Гужовский В.В., Винокурский Х.А., Волков Д.П., Панкратов С.А., Линский Л.В., Подерни Р.Ю., Колосов Л.В., Белобров В.И. и другие.

Приоритетным направлением совершенствования современных отвалообразователей является оптимизация параметров длинных стреловых конструкций, позволяющая повысить технологические возможности и снизить металлоемкость машины в целом. Решению этой задачи способствует применение вантовых стреловых конструкций предварительного натяжения с неразрезными несущими элементами трубчатого ступенчато-переменного поперечного сечения. Однако, как показывает анализ ранее проведенных исследований, НДС таких конструкций исследовано недостаточно: не исследована работа вантовых систем при кососимметричном нагружении; не исследованы вопросы устойчивости сжатого центрального несущего стержня; не исследована работа стреловых конструкций по деформированной схеме.

Большая часть отмеченных в специальной литературе исследований стреловых конструкций отвалообразователей посвящена вопросам динамического нагружения, при этом экспериментальные исследования составляют малую часть от общего числа работ и относятся в основном к 60-м годам. Большинство авторов отмечает, что наибольшую опасность представляют динамические воздействия при передвижении и резонансные явления в стреловых конструкциях.

При проведении теоретических исследований НДС металлоконструкций отвалообразователей наибольшее распространение получил метод расчета по допускаемым напряжениям. Метод расчета по предельным состояниям при проведении подобных исследований практически не применялся ввиду постоянного изменения конструкций отвалообразователей и условий их работы.

При исследовании динамических процессов наиболее характерным подходом при составлении расчетных систем является замена распределенных масс сосредоточенными. Большинство авторов отмечает, что подобное приведение нагрузок является серьезным допущением. Отмечается также, что наибольшую погрешность подобное допущение дает при расчетах отвальных стрел с неразрезным несущим элементом.

Анализ специальной литературы показывает, что, несмотря на сравнительно большое число работ по исследованию НДС, в настоящее время в практике расчетов современных моделей отвалообразователей отсутствуют какие-либо устоявшиеся методики расчета стреловых металлоконструкций при различных видах статического и динамического нагружения.

В соответствии с изложенным и со сформулированной целью и идеей

работы, в ней были поставлены следующие задачи : разработать алгоритм расчета и исследовать работу вантовой системы отвальной стрелы при нагружении в горизонтальной плоскости с учетом нелинейности работы гибких элементов; разработать алгоритм расчета и исследовать НДС отвальной стрелы по деформированной схеме; разработать методику расчета отвальной стрелы на устойчивость; исследовать собственные динамические характеристики отвальной стрелы на основе расчетных моделей с распределенными параметрами; разработать алгоритм расчета отвальной стрелы при шагании; исследовать НДС приемной консоли и разработать инженерную методику ее расчета на прочность.

Исследование статических процессов в отвальной стреле ОШ-1900, представляющей собой сложную пространственную предварительно напряженную комбинированную конструкцию, с учетом ее конструктивных особенностей проводилось раздельно в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Основной целью расчета в горизонтальной плоскости считается определение оптимальных усилий предварительного натяжения вантовой системы, обеспечивающих при самом неблагоприятном сочетании внешних нагрузок растягивающие усилия во всех гибких элементах (канатах) и предотвращающих таким образом их раскрытие. При этом в расчетных схемах гибкие элементы традиционно заменяются равнопрочными стержнями, погонный вес которых не учитывается, а при определении усилий предварительного натяжения используется принцип суперпозиции.

Исследования, проведенные для оценки правомерности подобного подхода, показали, что в весоном гибком элементе в отличие от невесомого (рис.1) возникают дополнительные распорные усилия ΔH за счет собственного веса. Получена аналитическая зависимость этих дополнительных усилий ΔH от распора H_0 в невесоном элементе, отражающего смещение опорных точек Δ

$$\Delta H^3 + 2H_0 \Delta H^2 + H_0^2 \Delta H - q^2 l^2 EF / 24 = 0. \quad (1)$$

Аналогичная зависимость была получена между полным распором H и составляющей ΔH от собственного веса

$$q^2 l^2 / 24 H^2 = \Delta H / EF. \quad (2)$$

Анализ этих зависимостей показал, что даже при отсутствии внешней нагрузки в гибких элементах будет возникать продольные растягивающие

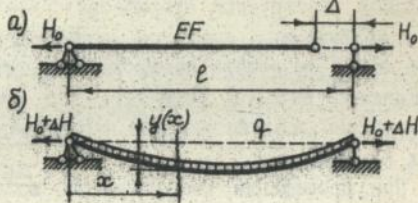


Рис.1 Продольное нагружение гибкой нити :

а) невесомой; б) весомой

усилия за счет собственного веса, величина которых будет определяться зависимостью $\Delta H = \sqrt{q^2 l^2 EF/24}$, что противоречит положенному в основу общепринятых методов расчета вантовых систем принципу суперпозиции и предположению о раскрытии канатов при нулевых нагрузках. Более того, при условно сжимающих нагрузках (т.е. при сближении опорных точек) в гибких элементах за счет собственного веса по-прежнему будут действовать растягивающие усилия. На рис. 2 показаны графики зависимостей (1) и (2) для одного из канатов вантовой системы отвальной стрелы ОШ-1900.

При анализе НДС отвальной стрелы в горизонтальной плоскости по традиционным методам расчета и с учетом работы канатов как весомых гибких нитей установлено, что за счет собственного веса канатов расчетные продольные усилия в наиболее загруженном канате возросли на 8,02%, а в наиболее загруженном пролете несущего стержня - на 10,45%. Для менее загруженных элементов максимальное отклонение расчетных продольных усилий составило 78,52%. При этом жесткость конструкции практически не меняется (прогибы увеличились до 12,49%). Показано, что основной целью расчета отвальной стрелы в горизонтальной плоскости должно стать определение усилий предварительного натяжения не для предотвращения раскрытия канатов, а для обеспечения достаточной жесткости конструкции.

В ходе исследования разработана и реализована на ЭВМ новая методика, позволяющая учитывать нелинейную зависимость (1) в линейных расчетных системах методов сил и перемещений. При этом решение получается методом последовательных приближений и имеет хорошую сходимость.

В вертикальной плоскости исследовалось НДС при различных вариантах загрузки - монтажном и грузовых при углах наклона несущего стержня в 0° и 18° . При этом учитывались технологические особенности загрузки конструкции, предусматривающие выравнивание линии опорных точек стрелы. Предложена оригинальная методика, позволяющая оценивать НДС в стреле за счет выравнивания. Показано, что это напряженное состояние с большой точностью соответствует напряженному состоянию при расчете отвальной стрелы на жестких опорах. Установлено, что наиболее опасным вариантом загрузки является рабочий режим при наклоне стрелы в 18° .

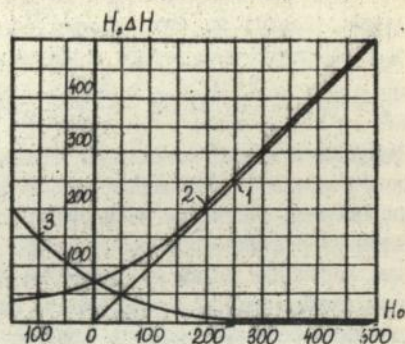


Рис. 2 Характеристика каната

$$l=26\text{м}, F=19,88\text{см}^2$$

1 - невесомого; 2 - весомого;

3 - добавки за счет веса

Для расчета отвальной стрелы на устойчивость предложены два алгоритма. Первый из них основан на уравнении изогнутой оси балки при продольно-поперечном изгибе в начальных параметрах

$$y(x) = y(0) + \frac{\theta(0)}{\alpha} \sin \alpha x + \frac{M(0)}{\alpha^2 EI} (1 - \cos \alpha x) + \frac{P(0)}{\alpha^3 EI} (\alpha x - \sin \alpha x); \quad \alpha = \sqrt{N/EI}. \quad (3)$$

Несущий стержень отвальной стрелы представляется в виде неразрезной или разрезной (в зависимости от конструкции стрелы) балки ступенчато-переменной жесткости на упругих опорах, податливость которых определяется из статического расчета. При этом допускается ступенчатое изменение жесткости балки не только на опорах, но и внутри пролетов. Раскрытие статической неопределенности осуществляется при помощи условий совместности перемещений на упругих опорах $y_i(l_i) = P_i/C_i$, при этом прогиб $y_i(l_i)$ в конце i -го участка представляется в виде линейной зависимости от единичных начальных параметров, выраженной через рекуррентные коэффициенты. Решение (собственные значения параметра α) системы уравнений совместности перемещений находится численным методом.

Этот алгоритм дает хорошую сходимость решения, легко реализуется на ЭВМ и может быть использован при расчете на устойчивость стреловых конструкций с любым числом пролетов. Применение его при расчете отвальной стрелы ОШ-1900 позволило оценить влияние на результаты расчета податливости упругих опор и ступенчато-переменной жесткости несущего стержня внутри пролетов.

Второй алгоритм основан на методе сил. Использование его при расчете отвальной стрелы ОШ-1900 позволило разработать инженерную методику определения первой формы потери устойчивости конструкций типа отвальной стрелы ОШ-1900.

Результаты расчета отвальной стрелы ОШ-1900 на устойчивость и от статических видов загрузки использовались для комплексной оценки прочности элементов конструкции, испытывающих сложное напряженное состояние, по допускаемым напряжениям. Максимальные расчетные напряжения составили 218,19 МПа в рабочем режиме при наклоне стрелы в 18° .

Исследования НДС отвальной стрелы по традиционной схеме довольно трудоемкие и окончательное решение при этом получается в три этапа, что, во-первых, не позволяет использовать такой подход на стадии проектирования, а, во-вторых, расчет проводится в линейной постановке, что не позволяет оценить геометрическую нелинейность конструкции.

Поскольку в специальной литературе нет сведений о проведении подобных исследований в нелинейной постановке, для расчета отвальной стрелы по деформированной схеме предложены два новых алгоритма, в основу которых легли уже изложенные алгоритмы расчета на устойчивость.

Расчетная схема отвальной стрелы ОШ-1900 по первому алгоритму, основанному на методе начальных параметров, имеет 10 неизвестных - продольные усилия в четырех пролетах и четырех канатах и начальные параметры на опоре. Для их нахождения используются четыре дополнительных уравнения равновесия в пролетах. Этот алгоритм легко реализуется на ЭВМ и может быть использован для выбора рациональных геометрических параметров отвальных стрел. Расчет отвальной стрелы ОШ-1900 показал, что по сравнению с расчетом в линейной постановке происходит переориентация опасных сечений в середине пролетов, при этом максимальные расчетные напряжения остались примерно на том же уровне ($\sigma_{\max} = 210,9$ МПа).

При расчете по второму алгоритму к системе линейных однородных канонических уравнений метода сил добавляются грузовые коэффициенты, учитывающие воздействие внешней нагрузки.

Оба предложенных алгоритма компактны и позволяют в отличие от многоступенчатого расчета на прочность с учетом потери устойчивости за один этап решения получать расчетные напряжения для заданной комбинации геометрических характеристик. Использование их при расчете ОШ-1900 позволило подобрать рациональную конструкцию отвальной стрелы, имеющую на 10,96% более низкую металлоемкость при неизменной несущей способности.

Наиболее распространенными видами динамических расчетов отвальной стрелы являются расчет на собственные колебания с целью отстройки от резонансных соотношений и расчет при шагании.

Обычно такие расчеты проводятся по схемам с приведенными параметрами, что, как известно, занижает значения собственных частот. Для оценки справедливости подобного подхода и значимости различных допущений в расчетных схемах в работе были проведены теоретические и экспериментальные исследования собственных колебаний отвальной стрелы ОШ-1900.

Для этого в качестве исходной была предложена математическая динамическая модель, максимально соответствующая реальной конструкции отвальной стрелы (рис. 3), - модель с распределенными параметрами, позволяющая учитывать колебания гибких связей и продольное сжатие несущего стержня. Реализация такой модели как системы с бесконечным числом степеней свободы производилась на основе точных методов строительной механики - метода перемещений, сил и начальных параметров.

В качестве основного был принят метод перемещений, для которого при формировании системы канонических уравнений учитывались колебания несущего стержня стрелы, колебания канатов и сосредоточенных масс.

Для колебаний канатов на основе волнового уравнения $\ddot{u} = c^2 u''$ получены зависимости, позволяющие учитывать продольные и поперечные колебания каната произвольного положения.

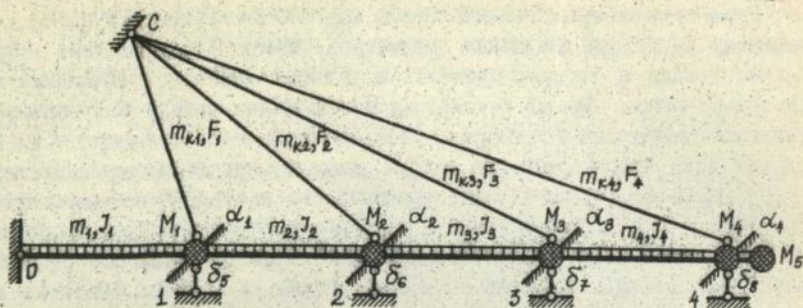


Рис.3 Расчетная динамическая модель отпальной стрелы ОШ-1900

Колебания весомого несущего стержня в строительной механике обычно учитываются на основе известных решений для колебаний простых балок, полученных из уравнения изогнутой оси балки в начальных параметрах

$$u(x) = \left[u_0 A_{kx} + \theta_0 \frac{B_{kx}}{k} + M_0 \frac{C_{kx}}{k^2 EI} + Q_0 \frac{D_{kx}}{k^3 EI} \right] \sin \omega t; \quad (4)$$

и его производных, где $A_{kx}, B_{kx}, C_{kx}, D_{kx}$ — функции академика А.Н.Крылова.

Эти уравнения соответствуют дифференциальному уравнению колебаний весомого стержня без учета продольной силы

$$\pi \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = 0. \quad (5)$$

Однако, применительно к отпальной стреле использование этих решений неправомерно, поскольку в несущем стержне действуют значительные (до 2500 кН для ОШ-1900) продольные сжимающие усилия, которые снижают собственные частоты.

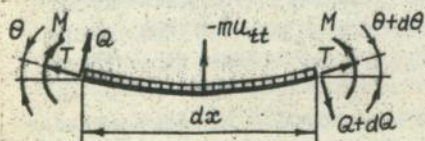


Рис.4 Колебания весомого стержня с учетом продольной силы

На основе полного дифференциального уравнения поперечных колебаний весомого стержня (рис.4)

$$\pi \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = 0; \quad (6)$$

и его решений в виде уравнения поперечных перемещений стержня

$$u(x, t) = \operatorname{Re} (C_1 e^{tkx} + C_2 e^{-tkx} + C_3 e^{tKx} + C_4 e^{-tKx}) e^{-i\omega t}; \quad (7)$$

$$\text{где } k = \sqrt{[\sqrt{T^2 + 4EI\pi\omega^2} - T] / 2EI}; \quad K = \sqrt{[\sqrt{T^2 + 4EI\pi\omega^2} + T] / 2EI}, \quad (8)$$

в работе было получено уравнение изогнутой оси весомого стержня при

колебаниях с учетом продольной силы в начальных параметрах

$$u(x) = \left[u_0 A_{kx} + \theta_0 \frac{B_{kx}^*}{k} + M_0 \frac{C_{kx}}{k^2 EI} + Q_0 \frac{D_{kx}}{k^3 EI} \right] \sin \omega t; \quad (9)$$

где функции $A_{kx} = \frac{k^2 \operatorname{ch} kx + K^2 \cos kx}{K^2 + k^2}$; $B_{kx} = k \frac{K \operatorname{sh} kx + k \operatorname{sink} x}{K^2 + k^2}$;

$$C_{kx} = k^2 \frac{\operatorname{ch} kx - \cos kx}{K^2 + k^2}; \quad D_{kx} = k \frac{k \operatorname{sh} kx - K \operatorname{sink} x}{K^2 + k^2}; \quad A_{kx}^* = \frac{K^2 \operatorname{ch} kx + k^2 \cos kx}{K^2 + k^2}; \quad (10)$$

$$B_{kx}^* = \frac{k^3 \operatorname{sh} kx + K^3 \operatorname{sink} x}{k(K^2 + k^2)}; \quad D_{kx}^* = \frac{K^3 \operatorname{sh} kx - k^3 \operatorname{sink} x}{k(K^2 + k^2)};$$

в отличие от известных функций академика А. Н. Крылова учитывают влияние продольных усилий. Нетрудно заметить, что при $T=0$ полученные функции автоматически трансформируются в функции академика Крылова. Для этих функций также выполняются соотношения прямого дифференцирования.

На основе уравнения (9) и его производных, аналогично существующим, получены решения для колебаний простых балок с учетом продольной силы, которые отличаются лишь содержанием входящих в них коэффициентов.

Значения собственных частот отвалной стрелы ОШ-1900 на основе предложенной математической модели определялись численным методом. Первое значение собственной частоты оказалось равным 5,46 рад/с и имело рассогласование в пределах 10% с результатами экспериментальных замеров автора на ОШ-1900 в Солигорске и НИТРИ в Брянске.

Варьирование в пределах принятой математической модели различными параметрами дало возможность оценить значимость тех или иных допущений в расчетных схемах. При расчете по схеме с распределенными параметрами первая собственная частота оказалась выше, чем по схеме с приведенными массами в 1,57 раза, что позволяет рекомендовать увеличение скорости конвейера. Установлено, что для ОШ-1900 частоты основных внешних динамических воздействий (конвейер, шагание) не дают резонансных соотношений с частотами собственных колебаний.

В качестве инженерного метода расчета отвалной стрелы на собственные колебания был предложен расчет по методу сил, который позволяет на стадии проектирования оценить значение первой собственной частоты с точностью до 5% и может быть реализован на микрокалькуляторе.

Динамический расчет отвалной стрелы при шагании обычно производится по схеме с приведенными массами, а исходными данными для расчета являются ускорения опорных точек при шагании, полученные графическим методом кинематического анализа. Однако, помимо допущений в расчетной схеме при подобном подходе серьезное влияние на конечные результаты

оказывают погрешности графического дифференцирования и неучет колебаний опорной платформы при шагании.

Поэтому для исследования НДС отвальной стрелы при шагании в настоящей работе была использована динамическая расчетная модель стрелы с распределенными параметрами, а в качестве исходных данных для расчета — перемещения опорных точек, полученные при помощи аналитического метода кинематического анализа, в основу которого положены постоянные геометрические соотношения между элементами механизма шагания.

При этом полученные аналитически диаграммы перемещений опорных точек представлялись в виде гармонических функций — рядов Фурье

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^N (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t); \quad (11)$$

где ω_n — частота n -й гармоники, динамический расчет проводился для каждой гармоники ряда в отдельности, а окончательное решение получалось как сумма решений для отдельных гармоник.

Проведенные исследования НДС отвальной стрелы при шагании позволили сделать следующие выводы: в современных отвалообразователях при существующих режимах и условиях работы шагание не представляет опасности, так как оно производится при незагруженном конвейере, а возникающие при этом динамические напряжения не превышают дополнительных напряжений от веса грунта; наибольшую опасность представляет режим шагания с опиранием на край опорной платформы при котором динамические напряжения достигают 8% от суммарных статических; учет продольного сжатия несущего стержня не оказывает влияния на результаты расчета.

Динамический расчет при шагании по методу сил с достаточной точностью может быть использован в качестве инженерного метода расчета.

Исследование НДС приемной консоли, представляющей собой пространственную конструкцию с двумя основными несущими элементами в виде двутавровых балок большой жесткости, проводились с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и метода сил при различных вариантах нагружения. При расчете по МКЭ использовался программный комплекс "ПолиФем", разработанный в институте "ПромстройНИИПроект" (г. Донецк).

Установлено, что наиболее опасным для приемной консоли ОШ-1900 является рабочий режим загрузки, когда напряжения в элементах возникают от вертикальных нагрузок как в статически определимой балке, максимальные расчетные напряжения при различных вариантах загрузки не превышали 170 МПа. Напряжения от ветровых нагрузок оказались на два порядка меньше, чем от весовых. Для конструкции приемной консоли ОШ-1900 результаты расчета по балочной схеме с точностью до 3% соответствуют результатом расчета по МКЭ.

При исследовании влияния поперечных нагрузок, проведенного по МКЭ и по методу сил с учетом и без учета деформации плоских сечений двутавровых балок, установлено, что поперечную сдвигающую нагрузку воспринимают практически лишь стержни нижнего пояса. Показано, что с точностью до 2-3% расчет приемной консоли можно проводить по безмоментной теории. Свободную часть консоли можно рассчитывать как плоскую ферму, при этом ошибка при определении экстремальных напряжений составляет не более 7%. Для инженерных расчетов предложен упрощенный метод расчета на сдвигающую поперечную нагрузку, предполагающий раздельный расчет свободной и стесненной части консоли. При этом усилия в верхних стержнях свободной части приемной консоли приравнивались нулю, а в стержнях стесненной части определялись как сумма составляющих от изгиба и кручения консоли. Погрешность этого метода не превышает 8%. Установлено, что если торец приемной консоли не будет зашит диафрагмой, то свободная часть консоли будет испытывать кручение как открытый тонкостенный профиль с большими касательными напряжениями.

При расчетах по МКЭ использовалась аппроксимация двутавровых балок приемной консоли в виде стержней и пластинок. Установлено, что стержневая конечноэлементная аппроксимация не обеспечивает достаточной точности определения расчетных параметров. Ошибка при этом превышает 50%.

Для оценки справедливости основных теоретических положений работы в 1991 году были проведены экспериментальные исследования ОШ-1900 на соловалье 2го рудоуправления ПО "Белорускалий" и сделан анализ отмеченных в специальной литературе результатов экспериментальных исследований различных конструкций отвалообразователей.

В ходе экспериментальных исследований замерялась частота собственных колебаний отвальной стрелы и усилия в канатах вантовой системы при кососимметричном нагружении стрелы. При исследовании динамических характеристик экспериментально была подтверждена необходимость учета продольных усилий в несущем стержне отвальной стрелы при определении спектра собственных частот. Расхождение между опытными и расчетными значениями первой собственной частоты отвальной стрелы в вертикальной плоскости не превышало 17%. При исследовании работы вантовых систем замерялись дополнительные продольные усилия в канатах при изменении угла бокового наклона отвалообразователя. Расхождение с расчетными значениями измеряемых величин не превышало 25%.

В специальной литературе также имеются результаты экспериментальных исследований ОШ-1900, проведенных НИПРИ в 1985 году. Отмечена хорошая сходимость этих результатов и результатов расчета приемной консоли при различных вариантах загрузки и отвальной стрелы при шагании. Рас-

хождение расчетных и экспериментальных значений не превышало 9%. Качественно полученные экспериментально осциллограммы процессов в элементах отвальной стрелы при шагании соответствуют аналогичным расчетным диаграммам.

Использование предложенного алгоритма динамического расчета отвальных стрел при шагании для расчета отвальной стрелы ОШ-1500 и сравнение полученных данных с имеющимися в специальной литературе результатами экспериментальных исследований на этом отвалообразователе показало их хорошую сходимость при качественном соответствии процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнено научное обоснование математических моделей и алгоритмов расчета стреловых металлоконструкций отвалообразователей роторных комплексов как систем с распределенными параметрами с учетом геометрической нелинейности при различных вариантах статического и динамического нагружения и разработаны инженерные методики, позволяющие оптимизировать геометрические характеристики и совершенствовать такие конструкции.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлены особенности учета кососимметричных нагрузок (которыми являются горизонтальная проекция весовых нагрузок при боковом наклоне отвалообразователя и ветровая нагрузка), для которых использование принципа суперпозиции и игнорирование собственным весом канатов (что положено в основу существующих методов расчета) недопустимо. Разработана математическая модель и алгоритм расчета вантовой системы, достоверность которых подтверждена экспериментальными исследованиями автора на ОШ-1900 и заводскими замерами ДМЗ.

2. Исследована устойчивость несущего стержня отвальной стрелы; разработаны математические модели и алгоритмы расчета, отличающиеся возможностью учета ступенчато-переменной жесткости внутри пролетов; исследовано влияние на устойчивость стрелы различных параметров и предложена инженерная формула, позволяющая с высокой точностью определять первую форму потери устойчивости для отвальных стрел с неразрезным несущим элементом.

3. Разработана математическая модель и алгоритм расчета отвальной стрелы с учетом геометрической нелинейности, позволяющие с целью наиболее равномерного распределения нагрузок определять рациональные геометрические параметры. Использование такого подхода при проектировании новой модели отвальной стрелы ОШ-1900 позволило снизить ее металлоем-

кость на 11%.

4. Разработана динамическая математическая модель отвальной стрелы, учитывающая влияние продольного сжатия несущего стержня и колебаний подвесных канатов. Получено уравнение изогнутой оси стержня в начальных параметрах через функции, аналогичные функциям академика А.Н. Крылова, но учитывающие влияние продольных сил. На основе этого уравнения получены решения для простых балок, отличающиеся от существующих (без учета продольной силы) новыми динамическими функциями.

5. Исследовано влияние на спектр собственных частот отвальной стрелы различных допущений в расчетных схемах; установлено, что использование расчетных схем с приведенными массами занижает значения собственных частот до 35%; вследствие неучета продольного сжатия погрешность расчета достигает 57%, а влияние колебаний подвесных канатов - 5%. На основе разработанной динамической модели предложен алгоритм расчета отвальной стрелы на собственные колебания, достоверность которого подтверждена экспериментальными исследованиями автора и НИТРИ по оценке параметров НДС металлоконструкций ОШ-1900. Проведенные исследования и проверка резонансных соотношений позволили рекомендовать увеличение скорости конвейера до 1,5 раз.

6. Разработана математическая модель шагания отвалообразователя, учитывающая колебания опорной платформы при шагании, и получены зависимости, позволяющие получать исходные параметры процесса шагания в удобном для дальнейших расчетов аналитическом виде. Предложен алгоритм исследования НДС отвальной стрелы при шагании. Установлено, что общее НДС стрелы при шагании обусловлены действием нагрузок двух процессов (колебаний и удара) и предложена методика их разделения. Установлено, что при существующих режимах работы ОШ процесс шагания не представляет серьезной опасности, так как дополнительные нагрузки при этом не превышают нагрузок от веса транспортируемого материала. Определены допустимые значения параметров режима шагания.

7. Методом конечных элементов рассчитано НДС состояние приемной консоли; обоснованы возможности упрощения расчетных схем и разработаны методики расчета консоли при различных вариантах нагружения, достоверность которых подтверждается результатами экспериментальных исследований НИТРИ.

8. Разработана методика расчета силовых металлоконструкций отвалообразователей на прочность, внедрение которой в ПО Донецкгормаш в 1988 году при проектировании новой модели отвалообразователя дало экономический эффект в 457,6 тысяч рублей (в ценах 1961 года) за счет снижения затрат на расчеты и совершенствование геометрических параметров стрело-

Основные научные положения диссертации отражены в следующих печатных работах автора :

1. Татьяначенко А.Г., Титов Л.А., Шевченко Ф.Л. К расчету отвальной стрелы отвалообразователя на прочность. - Донецк: ДПИ, 1988. - 12 с. - Деп. в УкрНИИТИ 31.10.88, № 2771 - Ук 88.
2. Татьяначенко А.Г. Динамический расчет отвальной стрелы отвалообразователя при шагании // Вычислительный эксперимент и его применение в исследованиях при разработке высокопроизводительных и экономически чистых технологий добычи угля : Тез. докл. Всесоюз. научно-техн. конф. 6-8 декабря 1989 г. - М.: 1989. - С. 66-67.
3. Татьяначенко А.Г. К расчету многопролетных вантовых стреловых конструкций на устойчивость. - Донецк: ДПИ, 1989. - 12 с. - Деп. в УкрНИИТИ 1.09.89, № 1973 - Ук 89.
4. Татьяначенко А.Г. Кинематический анализ механизма шагания отвалообразователя ОШ-1900. - Донецк: ДПИ, 1989. - 12 с. - Деп. в УкрНИИТИ 25.09.89, № 2096 - Ук 89.
5. Татьяначенко А.Г. Исследование динамических процессов в отвальной стреле отвалообразователя ОШ-1900 при шагании. - Донецк: ДПИ, 1989. - 14 с. - Деп. в УкрНИИТИ 25.08.89, № 1970 - Ук 89.
6. Татьяначенко А.Г. Расчет на прочность отвальных стрел отвалообразователей по деформированной схеме // Научные достижения и опыт отраслей машиностроения - народному хозяйству : Тез. докл. респ. научно-техн. конф. 25-27 сентября 1990 г. - Харьков, 1990. - С. 77-78.
7. Татьяначенко А.Г. Статический расчет предварительно напряженных вантовых систем отвальных стрел отвалообразователей на эксплуатационную нагрузку // Научные достижения и опыт отраслей машиностроения - народному хозяйству : Тез. докл. респ. научно-техн. конф. 25-27 сентября 1990 г. - Харьков, 1990. - С. 76-77.
8. Шевченко Ф.Л., Татьяначенко А.Г. К расчету на прочность отвальной стрелы отвалообразователя в режиме шагания // Изв. вузов. Строительство и архитектура. - 1990. - № 3. - С. 92-95.
9. Шевченко Ф.Л., Татьяначенко А.Г. К расчету устойчивости отвальных стрел отвалообразователей // Изв. вузов. Горный журнал. - 1992. - № 3.
10. Шевченко Ф.Л., Татьяначенко А.Г. К расчету кинематических характеристик механизма шагания отвалообразователя ОШ-1900 // Горн., строит. и дор. машины : Респ. межвед. научно.-техн. сб. - К.: 1990.

Подп. в печать 17.11.93. Формат 60x84 1/16. Бумага типографская.
Офсетная печать. Усл. печ. л. 0,93. Усл. кр.-отт. 1,16. Уч.-изд. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 4-6988.

Государственная горная академия Украины,
320600, ГСП, г. Днепропетровск-14, пр. Карла Маркса, 19

ДМАПП, 340050, Донецк, ул. Артема, 96

10/1000

AB 28849

AB 28.849