

01.02.06
С138

На правах рукописи



Сагдеев Константин Борисович

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ
КРАНО-МАНИПУЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК
ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Специальность 01.02.06 –
"Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
2006

Работа выполнена на кафедре "Летательные аппараты" Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Ю.С. Павлюк.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор А.И. Телегин,
кандидат технических наук А.А. Демченко.

Ведущее предприятие – ОАО "АЗ"Урал", г. Миасс.

Защита состоится "24" мая 2006 г., в 15_00 ч., на заседании специализированного диссертационного совета Д212.298.02 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан "21" апреля 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.298.02,
доктор технических наук, профессор

 А.О. Чернявский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Создание крано-манипуляторных установок (КМУ) является одним из новых, перспективных направлений развития грузоподъемной техники. Благодаря своей универсальности и экономической эффективности они нашли широкое применение в лесной и деревообрабатывающей промышленности (лесозаготовительные), в строительстве, при переработке и сборе металлолома.

Особенности конструкций стрел и их гидроприводов не позволяют полностью распространить на крано-манипуляторные установки результаты исследований нагруженности кранов, а результаты существующих зарубежных исследований в области нагруженности крано-манипуляторных установок для нас недоступны. В связи с этим для нового класса грузоподъемных машин недостаточно разработаны подходы к оценке нагруженности (расчетные условия нагружения, расчетные случаи), отсутствуют корректные методики расчета динамических нагрузок.

Все это приводит к неоптимальности и неравнопрочности конструкции и как следствие к увеличению массы, снижению надежности и к увеличению объема испытаний. Таким образом, исследование нагруженности и разработка эффективных методов расчета динамических нагрузок крано-манипуляторных установок являются актуальными проблемами.

Цель диссертации состоит в определении нагруженности крано-манипуляторных установок при переходных режимах работы на основе исследований условий эксплуатации и выделения расчетных случаев нагружения, моделирования рабочих процессов с учетом упругих деформаций стрел и особенностей гидроприводов стрел (податливостей рабочей жидкости и элементов гидропривода, характеристик предохранительных клапанов).

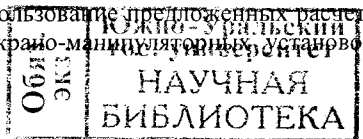
Научная новизна диссертации заключается в следующем.

1. Обобщены основанные положения для расчетов динамических нагрузок, определены расчетные случаи нагружения крано-манипуляторных установок (кинематические положения стрел), изложенные в разработанном стандарте предприятия.

2. Разработаны математические модели крано-манипуляторных установок, позволяющие учитывать влияние упругих деформаций стрел и особенностей гидроприводов стрел (податливостей рабочей жидкости и элементов гидропривода, характеристик предохранительных клапанов) на динамическую нагруженность при переходных режимах работы. Предложенный подход также позволяет свести конструкции крано-манипуляторных установок к упрощенной модели (одномассовой) при расчете нагрузок.

3. На основе упрощенной модели (одномассовой) разработан и защищен патентом способ определения динамических нагрузок с учетом случайного характера отклонений от средних величин массы груза, скорости груза и динамических усилий в гидроцилиндрах стрел.

Практическая значимость работы. Использование предложенных расчетных подходов исследований нагруженности крано-манипуляторных установок



позволяет достоверно определять уровень нагрузок, оценивать влияние разброса параметров КМУ и как следствие, улучшить технические характеристики проектируемых конструкций. Результаты, полученные в ходе исследования, используются при расчете элементов конструкции на прочность и определении оптимальных параметров конструкции.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Перечень основных расчетных случаев нагружения КМУ (кинематические положения стрел).

2. Математические модели КМУ, позволяющие учитывать влияние упругих деформаций стрел, податливостей рабочей жидкости и элементов гидропривода, характеристик предохранительных клапанов на динамическую нагруженность при переходных режимах работы.

3. Методика расчета динамических нагрузок КМУ при переходных режимах работы, конечно-элементная и упрощенная (одномассовая) модели, позволяющие учитывать упругие деформации стрел, податливости рабочей жидкости и элементов гидропривода, характеристики предохранительных клапанов.

4. Результаты экспериментальных исследований на натурном образце КМУ нагруженности элементов конструкций стрел и их гидроприводов при переходных режимах работы.

5. Способ определения динамических нагрузок с учетом случайного характера отклонений от средних величин массы груза, скорости груза и динамических усилий в гидроцилиндрах стрел.

6. Методика построения грузовысотной характеристики лесозаготовительной КМУ для трех вариантов исполнения механизма поворота стрел.

Достоверность научных положений и выводов работы подтверждается сопоставлением результатов расчетов, выполненных на основе разработанных методик с результатами экспериментов, динамических испытаний натурного образца КМУ "Синегорец-75", выполненных на испытательном стенде предприятия ЗАО "НК Уралтерминалмаш" (г. Миасс) с использованием современной аппаратуры.

Реализация работы. Разработанные подходы оценки нагруженности КМУ внедрены на предприятие ЗАО "НК Уралтерминалмаш". С использованием предложенных методик проведены расчеты и анализ динамических нагрузок КМУ "Синегорец" грузоподъемностью 25, 75, 110, 130, 210 кН·м с учетом которых выполнены расчеты на прочность и разработана проектно-конструкторская документация. Таким образом, результаты настоящей работы внедрены во все КМУ марки "Синегорец", находящиеся в серийном, опытном изготовлении и эксплуатации.

Апробация работы. Основные положения диссертации были доложены и обсуждены:

– на I-м семинаре "Проблемы развития гидропривода в различных отраслях промышленности" (г. Новосибирск, Сибирский научно-исследовательский институт имени С.А. Чаплыгина) в 2003 г.;

- на XXIV-й Российской школе "Наука и технологии" (г. Миасс) в 2004 г.;
- на научном семинаре кафедр "СУ и ММ", "Автоматика и техническая механика" Миасского филиала ЮУрГУ в 2006 г.

Публикации. Основные положения диссертационной работы отражены в 7 публикациях, а также в стандарте предприятия "Краны-манипуляторы грузоподъемные. Нормы прочности" (ЗАО "НК Уралтерминалмаш").

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы из 105 наименований. Общий объем работы – 157 страниц машинописного текста, включая 48 рисунков, 16 таблиц и 3 приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель работы, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор литературы по вопросам, посвященным разработке теоретических основ динамики рабочих процессов КМУ и другой грузоподъемной техники, основам конструирования и расчета КМУ: В.И. Брауде, А.А. Вайнсона, Д.П. Волкова, М.М. Гохберга, С.А. Казака, С.П. Тимошенко. Дан краткий аналитический обзор работ авторов, исследовавших оптимизацию параметров конструкции, напряженное состояние металлоконструкции, математическое моделирование поведения КМУ, динамическую нагруженность КМУ в различных режимах работы: В.А. Александрова, А.В. Жукова, З.К. Емтыля, М.В. Склемина, А.П. Татаренко и некоторых других.

На основе проведенного анализа состояния вопроса установлено следующее:

- недостаточно исследованы расчетные условия нагружения, не выделены основные расчетные случаи нагружения, отсутствуют нормативы по нагруженности КМУ;

- отсутствуют корректные методики расчета динамических нагрузок КМУ, не исследовано влияние упругих деформаций стрел, податливостей рабочей жидкости и элементов гидропривода, характеристик предохранительных клапанов;

- недостаточно исследовано влияние случайных отклонений массы груза, скорости груза и динамических усилий в гидроцилиндрах стрел на динамическую нагруженность КМУ.

В соответствии с целью работы, и исходя из проведенного анализа состояния вопроса, поставлены следующие основные задачи:

- определить расчетные условия нагружения, выделить основные расчетные случаи нагружения конструкции КМУ (кинематические положения стрел);

- разработать математические модели КМУ, позволяющие учитывать влияние упругих деформаций стрел, податливостей рабочей жидкости и элемен-

тов гидропривода, характеристик предохранительных клапанов на динамическую нагруженность при переходных режимах работы;

- на натурном образце КМУ экспериментально определить нагруженность конструкций стрел и их гидроприводов при переходных режимах работы;
- установить влияние на нагруженность случайного характера отклонений от средних величин массы груза, скорости груза и динамических усилий в гидроцилиндрах стрел;
- разработать методику построения грузовысотной характеристики лесозаготовительной КМУ для трех вариантов исполнения механизмов поворота стрел (гидроцилиндр, гидроцилиндр совместно с качалкой и шатуном, гидроцилиндр совместно с шарнирно-рычажной системой).

Вторая глава посвящена исследованию грузоподъемности и расчетных условий нагруженности КМУ. Также глава содержит постановку и решение задач определения динамических нагрузок при опускании и торможении груза стрелой, при повороте и торможении груза колонной. Оценивается влияние случайного характера отклонений от средних величин массы груза, скорости груза и динамических усилий в гидроцилиндрах стрел на динамические нагрузки

Грузовысотная характеристика (ГХ) КМУ массы (рис. 1), в отличие от кранов, представляет собой не линию, а некоторую область, в пределах которой, в зависимости от взаимного расположения звеньев можно перемещать груз, заданной. Рабочая область КМУ была разделена на четыре зоны (рис. 2), так что в пре-

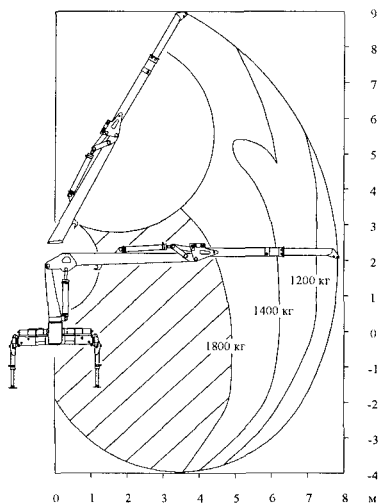


Рис. 1. Грузовысотная характеристика КМУ "Синегорец-75"

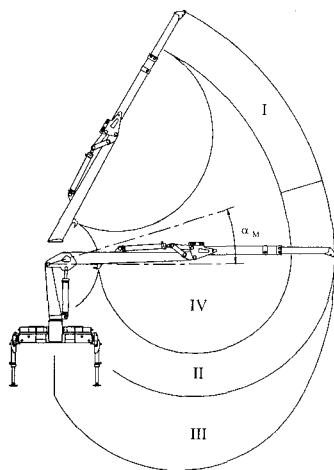


Рис. 2. Зоны рабочей области

делах каждой из них наибольшая грузоподъемность обеспечивается определенной конфигурацией многозвенной стрелы. При этом, полагая, что наибольшей

грузоподъемности соответствует конфигурация, при которой подъемная стрела наиболее близко расположена к углу α_m . Этот угол соответствует максимальному плечу гидроцилиндра подъемной стрелы.

С учетом принятых допущений разработана программа построения ГХ лесозаготовительной КМУ для трех вариантов исполнения механизма поворота стрел: гидроцилиндр; гидроцилиндр, качалка и шатун; гидроцилиндр и шарнирно-рычажная система. В программе для заданного дискретного значения груза последовательно по зонам для соответствующих конфигураций стрелы подбираются углы поворота стрел и выдвижение телескопической стрелы с учетом условий равновесия стрел и срабатывания предохранительных клапанов.

В результате проведенных исследований грузоподъемности КМУ определены условия использования наибольшей грузоподъемности (конфигурации стрелы для каждой зоны); предложен расчетный показатель для оценки ГХ. Показатель позволяет сравнивать грузовысотные характеристики КМУ, различных по грузоподъемности и конструктивному исполнению. На практике четыре зоны, выделенные ранее, удобно привести к двум, что изложено в эксплуатационной документации для КМУ "Синегорец".

Особенности рабочих процессов лесозаготовительных КМУ, дают основание характеризовать режим их работы как нестационарный, представляющий собой комбинацию закономерных и случайных сочетаний движущих сил и сил сопротивления, обуславливающих неустановившийся характер работы. Наиболее тяжелыми режимами работы с точки зрения нагруженности конструкции являются переходные. Поэтому максимальные нагрузки реализуются при переходных режимах работы и определяются срабатыванием предохранительных клапанов гидроприводов стрел КМУ.

Опыт создания моделей КМУ марки "Синегорец" и анализ информации по данному вопросу позволили выделить следующие основные расчетные случаи нагружения, изложенные в разработанном стандарте предприятия ЗАО "НК Уралтерминалмаш":

- режим рабочего состояния, работа с грузом меньше или равным номинальному значению;
- опускание, подъем номинального груза стрелой с торможением (действие вертикальных нагрузок);
- поворот номинального груза колонной с торможением (действие горизонтальных нагрузок);
- совмещенное движение (опускание номинального груза стрелой одновременно с поворотом колонной) с торможением;
- транспортирование в составе транспортного средства, действие на конструкцию КМУ продольных, поперечных и вертикальных перегрузок относительно транспортного средства;
- действие на КМУ нагрузок, вызванных особенностями эксплуатации грузозахватных органов;

– действие на выдвигные опоры (аутригеры) вертикальных и горизонтальных нагрузок относительно опор.

При анализе нагруженности конструкции кроме основных рассматриваются аварийные случаи нагружения, выходящие за условия нормальной эксплуатации, а также ветровые нагрузки и наклон транспортного средства (при необходимости).

Разработанный стандарт предприятия соответствует проекту европейского стандарта prEN 12999, но содержит более полный перечень расчетных случаев нагружения. Случай внезапного освобождения груза в стандарте предприятия отсутствует. Проведенные оценки показали, что этот случай не является расчетным для прочности, нагрузки не превышают нагрузки случая действия вертикальных нагрузок.

Ветровые нагрузки, действующие в плоскости движения стрел, можно не учитывать т.к. момент от этих нагрузок мал по сравнению с моментом от веса, тем более с учетом инерционных сил при торможении груза. Ветровые нагрузки, действующие перпендикулярно плоскости стрел, при разгоне и торможении колонны не увеличивают инерционных сил. В случае мгновенного торможения колонны ветровую нагрузку необходимо учитывать т.к. она увеличивает инерционные силы.

При моделировании процесса опускания и торможения груза стрелой использовались несколько моделей. Сначала, на основе модели с сосредоточенными массами, раздельно для каждой стрелы определялась силовая характеристика гидропривода, затем выполнялся расчет динамических сил, моментов в элементах конструкции на основе конечно-элементной модели всей конструкции и полученных силовых характеристик гидроприводов стрел.

По каждому гидроцилиндру стрелы характеристика определялась путем решения соответствующей системы уравнений, состоящей из уравнения движения штока и расхода рабочей жидкости. При расчете гидропривода стрелы конструкции стрел и гидроприводы других стрел считались жесткими, также принимали, что: статическая расходно-перепадная характеристика предохранительного клапана имеет линейную зависимость; динамика предохранительного клапана учитывалась увеличенным значением перепада давления $\Delta p = 15 - 20 \text{ кгс/см}^2$ в начале открытия для статической расходно-перепадной характеристики; сухое трение в гидроцилиндре учитывается соответствующим перепадом давления $\Delta p_{\text{тр}} = 5 \text{ кгс/см}^2$.

Расчетные силовые характеристики гидроцилиндров подъемной и выносной стрел, полученные для случая опускание и торможение груза ($M_{\text{тр}} = 1000 \text{ кг}$) подъемной стрелой КМУ "Синегорец-75" в горизонтальном положении приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что силовые характеристики имеют нелинейный характер. Это обусловлено утечками рабочей жидкости из нагруженных полостей гидроцилиндров, возникающими при срабатывании вторичных предохранительных клапанов, и дросселированием рабочей жидкости через ограничители расхода.

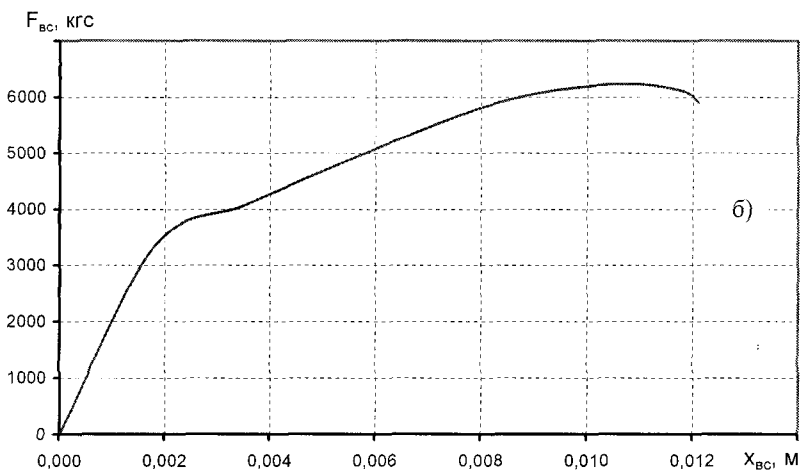
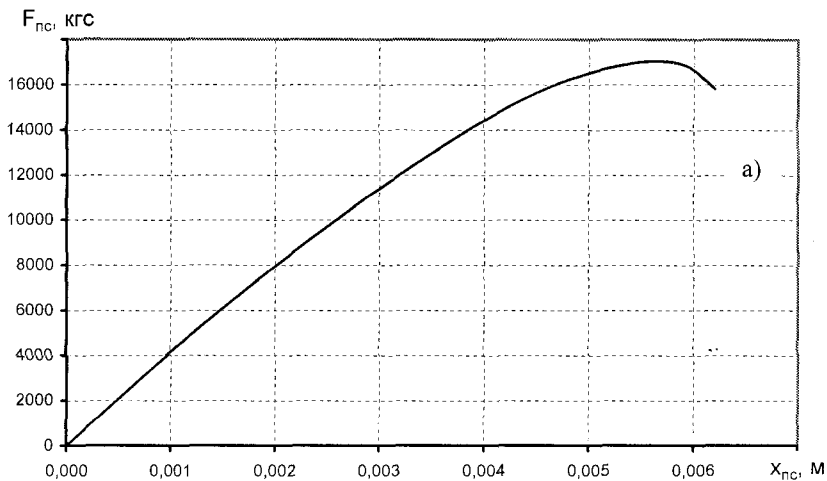


Рис. 3. Силовые характеристики гидроцилиндров стрел КМУ "Синегорец-75":
 а – подъемной стрелы;
 б – выносной стрелы

Для расчета конечно-элементной модели КМУ использовался пакет COSMOS. Вычислительная процедура включала статический и динамический анализ. При динамическом анализе использовался метод прямого численного интегрирования. Конечно-элементная модель КМУ состояла из трехмерных балочных элементов для стрел, колонны и стержневых элементов для гидроцилиндров стрел.

Силовые характеристики гидроцилиндров задавались диаграммами деформирования упруго-пластичного материала в виде нелинейных зависимостей по точкам. Массы грейферного захвата и груза учитывались сосредоточенной массой на головке телескопической стрелы. Влияние демпфирования конструкций стрел не учитывалось, поскольку основное влияние на нагруженность оказывают медленно затухающие колебания низших частот. Особенности транспортного средства, на котором установлена КМУ не рассматривались, т.к. их частоты не совпадают.

Достоверность предложенной расчетной методики подтверждалась динамическими испытаниями натурального образца КМУ "Синегорец-75". Разница между расчетными и экспериментальными максимальными величинами динамических сил на стрелах составляет менее 5%. Превышение расчетных значений по сравнению с экспериментальными объясняется рассеиванием энергии в конструкции КМУ.

Предложенная методика позволила оценить влияния нелинейности гидропривода на нагруженность конструкции. Сравнялись нелинейная и линейная расчетные схемы. В последних гидропривод стрел моделировался линейной пружиной с эквивалентной жесткостью. Результаты исследования (табл. 1) показывают, что линеаризация приводит к занижению собственных частот колебаний конструкции на 10%, а также к завышению величины коэффициента динамичности стрел на 5%. Для нелинейных моделей значения собственных частот, приведенные в таблице, определялись с учетом линейной характеристики с эквивалентной жесткостью.

Таблица 1

Расчетная схема	Частота колебаний, Гц	Ускорение груза, m/c^2	Перемещение груза, м	Подъемная стрела, K_d	Перегрузка на грузе
Линейная	0,67	6,43	0,34	1,54	1,64
Нелинейная	0,74	5,78	0,30	1,48	1,59

При моделировании процесса поворота и торможения груза колонной также использовались несколько моделей. Сначала на основе модели с сосредоточенными массами определялась силовая характеристика гидропривода колонны, затем на основе полученной характеристики и конечно-элементной модели всей конструкции проводился расчет динамических сил, моментов в элементах конструкции.

Расчетная силовая характеристика гидропривода колонны КМУ "Синегорец-75" приведена на рис. 4 в виде зависимости момента торможения. Нелинейность зависимости обусловлена дросселированием рабочей жидкости через дроссели и гидравлические демпферы в крайних положениях колонны.

Расхождение между расчетными и экспериментальными зависимостями для горизонтальной динамической силы на подъемной стреле обусловлено наложением на основную низкочастотную составляющую (0,3 Гц) дополнительной с частотой 9 Гц (рис. 5). Если дополнительную составляющую исключить, например, используя фильтр с частотой среза 2 Гц, то полученные расчетные зависимости

близки к экспериментальным. Наличие в расчетах дополнительной составляющей обусловлено влиянием высших форм поперечных колебаний стрел как консольной балки. При испытаниях эти формы не проявляются из-за демпфирования конструкции.

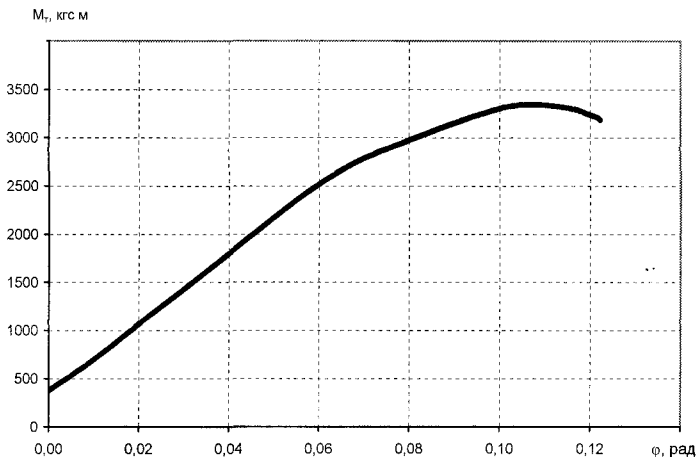


Рис. 4. Момент торможения колонны для "Синегорец-75"

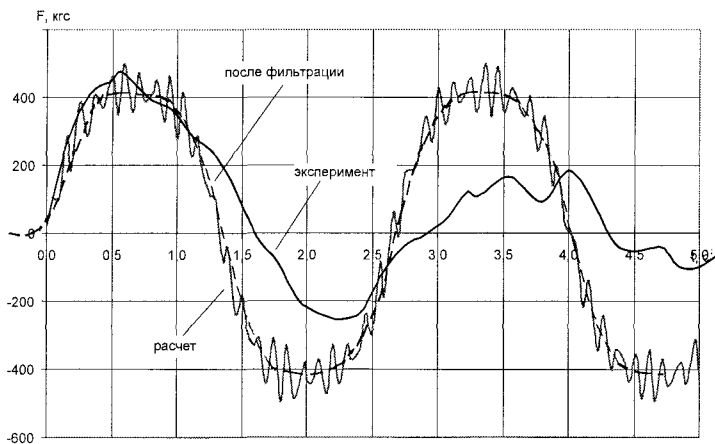


Рис. 5. Горизонтальные динамические силы на подъемной стреле

С использованием предложенной методики проведены расчеты и анализ динамических нагрузок КМУ "Синегорец" грузоподъемностью 25, 75, 110, 130 и 210 кН·м на основании которых проведены расчеты на прочность и разработана проектно-конструкторская документация, разработаны конструкция грузоподъ-

емной стрелы "Синегорец-210" и механизм подъема аутригера, защищенные патентами.

Значения коэффициентов динамичности случая опускания и торможения груза подъемной стрелой приведены в табл. 2. Можно отметить, что предложенная методика позволила модернизировать "Синегорец-110", повысив грузоподъемность до 130 кН·м, за счет уменьшения скорости. В результате, при сохранении общего уровня нагруженности, снизилась соответствующая динамическая составляющая.

Таблица 2

Параметр	Модель "Синегорец"				
	"С-25"	"С-75"	"С-110"	"С-130"	"С-210"
Колонна, K_d	1,17	1,46	1,55	1,27	1,18
Подъемная стрела, K_d	1,18	1,48	1,57	1,28	1,18
Выносная стрела, K_d	1,26	1,51	1,60	1,30	1,20
Телескопическая стрела, K_d	1,26	1,51	1,60	1,30	1,40
$V_{гр}$, м/с	0,6	1,4	1,8	1,4	1,9
$M_{гр}$, кг	400	1000	1440	1700	400
L , м	6,0	7,8	7,8	7,8	20,5

Разработанная методика расчета нагруженности дает возможность свести конструкцию КМУ к упрощенной модели (одномассовой). Это позволяет при решении некоторых технических задач получить простые аналитические зависимости для нагрузок. Рассмотрим случай опускания и торможения груза в горизонтальном положении (рис. 6).

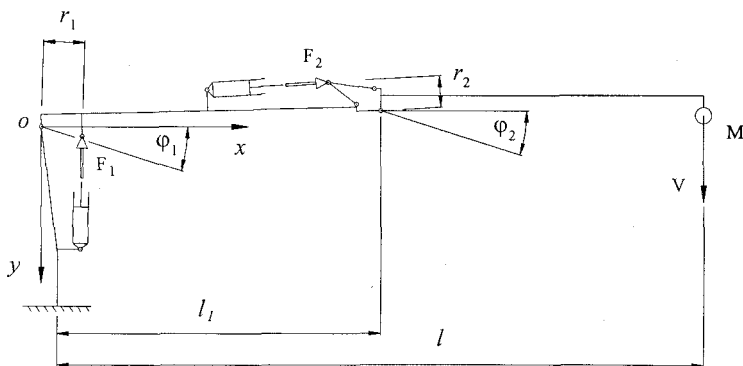


Рис. 6. Обобщенная кинематическая схема КМУ

Перемещение стрел в произвольном сечении x имеет вид:

$$y(x, t) = \varphi_1(t)x \cdot \delta_1(x - l_1) + [\varphi_1(t)l_1 + \varphi_2(t)(x - l_1)]\delta_2(x - l_1) + q(t) \cdot f(x).$$

Кинетическая энергия системы КМУ-груз

$$T = 0,5M \cdot \dot{y}^2(l, t) + 0,5 \int_0^l m(x) \cdot \dot{y}^2(x, t) dx = 0,5M[\dot{\varphi}_1 l_1 + \dot{\varphi}_2(l - l_1) + \dot{q} f(l)]^2 + 0,5 \int_0^l m(x) (\dot{\varphi}_1 x \delta_1 + [\dot{\varphi}_1 l_1 + \dot{\varphi}_2(x - l_1)] \delta_2 + \dot{q} f(x))^2 dx. \quad (1)$$

Потенциальная энергия системы КМУ-груз

$$\Pi = r_1 \int_0^{\varphi_1} F_1(\varphi_1, r_1) d\varphi_1 + r_2 \int_0^{\Delta\varphi} F_2(\Delta\varphi, r_2) d\Delta\varphi + 0,5 \int_0^l E(x) J(x) q^2 f^2(x) dx. \quad (2)$$

Подставляя выражения (1), (2) в уравнения Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i} \right) + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_i} = 0, \quad i = 1, 2; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) + \frac{\partial \Pi}{\partial q} = 0,$$

и используя свойство ортогональности $\delta_1(x_1 - l_1) \cdot \delta_2(x_1 - l_1) = 0$, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 l_1 \Delta M_{11} + \dot{\varphi}_2(l - l_1) \Delta M_{12} + \ddot{q} \Delta M_{13} + [\dot{\varphi}_1 l_1 + \dot{\varphi}_2(l - l_1) + \dot{q} f(l)] M + \frac{F_1(\varphi_1, r_1) r_1 - F_2(\Delta\varphi, r_2) r_2}{l_1} = 0, \\ \dot{\varphi}_1 l_1 \Delta M_{21} + \dot{\varphi}_2(l - l_1) \Delta M_{22} + \ddot{q} \Delta M_{23} + [\dot{\varphi}_1 l_1 + \dot{\varphi}_2(l - l_1) + \dot{q} f(l)] M + \frac{F_2(\Delta\varphi, r_2) r_2}{l - l_1} = 0, \\ \dot{\varphi}_1 l_1 \Delta M_{31} + \dot{\varphi}_2(l - l_1) \Delta M_{32} + \ddot{q} \Delta M_{33} + [\dot{\varphi}_1 l_1 + \dot{\varphi}_2(l - l_1) + \dot{q} f(l)] M + q C_{np} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $\delta_1(x - l_1) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq x \leq l_1 \\ 0, & \text{если } x > l_1 \end{cases}$; $\delta_2(x - l_1) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq x \leq l_1 \\ 1, & \text{если } x > l_1 \end{cases}$; φ_1, φ_2 – углы

поворота подъемной и выносной стрел относительно осей, проходящих через шарниры стрел; r_1, r_2 – плечи гидроцилиндров подъемной и выносной стрел; F_1, F_2 – силы сопротивления гидроцилиндров подъемной и выносной стрел; $q(t)$ – обобщенная координата; $f(x)$ – нормированная форма низшего тона изгибных колебаний жестко соединенных подъемной и выносной стрел ($f(l) = 1$); l – вылет стрел; l_1 – вылет подъемной стрелы; M – масса груза; V – скорость груза при торможении; $m(x)$ – погонная масса подъемной и выносной стрел; $E(x), J(x)$ – соответственно, модуль упругости, момент инерции сечения; ΔM_{ij} – коэффициенты при ускорениях имеющие размерность масс; $C_{np} = \int_0^l E(x) J(x) f^2(x) dx$ – приведенная к грузу изгибная жесткость стрел.

Оценки показали, что вместо вычисления значений ΔM_{ij} хорошее приближение к величине ΔM достигается, если ее определять в виде $\Delta M = J/l^2$, где J – момент инерции подъемной и выносной стрел относительно оси вращения стрелы

подъема. Таким образом, усреднением колебательного процесса и приведением инерции стрел к грузу динамическая модель КМУ с тремя степенями свободы сводится к модели с одной степенью свободы.

Тогда система уравнений (3) заменяется одним уравнением

$$(\Delta M + M)\ddot{Z} + C_{\Sigma}Z = 0,$$

с начальными условиями $Z(0) = 0$; $\dot{Z}(0) = V$,

где $Z = \varphi_1 l_1 + \varphi_2 (l - l_1) + q f(l)$ – перемещение груза; C_{Σ} – суммарная жесткость последовательно соединенных жесткостей, приведенных к грузу (стрел и гидроцилиндров стрел).

В линейной расчетной схеме силы сопротивления гидроцилиндров подъемной и выносной стрел линейно зависят от перемещений штоков

$$F_1(\varphi_1, r_1) = C_1 \varphi_1 r_1, \quad F_2(\Delta\varphi, r_2) = C_2 (\varphi_2 - \varphi_1) r_2,$$

где C_1, C_2 – жесткости гидроцилиндров подъемной и выносной стрел.

Учитывая нелинейность характеристик гидропривода, максимальную динамическую силу $F(z)_{\max}$ целесообразно определять из условия равенства энергий

$$\frac{(M + \Delta M)V^2}{2} = \int_0^{Z_{\max}} F(z) dz, \quad (4)$$

а коэффициент динамичности по изгибающему моменту равен

$$K_d = 1 + \frac{F(z)_{\max}}{g(M + \Delta M_{\text{стр}})},$$

где $\Delta M_{\text{стр}} = G_{\text{стр}} \cdot l_{\text{стр}} / l$ – статически приведенный к грузу вес стрел; $G_{\text{стр}}, l_{\text{стр}}$ – соответственно, вес и координата центра масс стрел.

В нелинейной расчетной схеме суммарная силовая характеристика, приведенная к грузу, определяется последовательным сложением податливостей от гидроцилиндров подъемной и выносной стрел и податливостей конструкций стрел. Максимальная динамическая сила $F(z)_{\max}$ и максимальное перемещение Z_{\max} определяется путем графического решения уравнения (4).

Результаты для упрощенной модели (одномассовой) приведены в табл. 3. Сравнение табл. 1 и 3 показывает, что упрощенные модели дают завышенные значения динамических параметров на 5–10% по сравнению с конечно-элементными моделями. Таким образом, при оценке нагруженности на этапе проектирования можно использовать упрощенные модели (одномассовые).

Таблица 3

Упрощенная расчетная схема	Частота колебаний, Гц	Ускорение груза, м/с ²	Перемещение груза, м	Подъемная стрела, К _д	Перегрузка на грузе
Линейная	0,66	6,25	0,36	1,57	1,64
Нелинейная	0,72	5,36	0,33	1,49	1,55

В общем случае, когда масса стрел значительно превышает массу груза, величина K_d начинает заметно изменяться по длине стрел из-за влияния их инерции на распределение изгибающего момента. Для "Синегорец-210" при общем вылете стрел 20,5 м изменение K_d по длине стрел достигает 20%. Поэтому учет распределения масс и упругости стрел вынуждает использовать численные методы при окончательных проверочных расчетах.

Динамические нагрузки КМУ имеют вероятностную природу т.к. зависят от разбросов нескольких случайных параметров. Таким образом, при оценке нагрузок целесообразно применять вероятностные подходы. При выполнении расчетов параметры, влияющие на динамические нагрузки, берутся в их наихудшем сочетании и по максимальным величинам.

Реализация крайних случаев нагружения может быть охарактеризована как редкое событие. Это обусловлено тем, что такие параметры как скорость опускания груза, масса груза, силы со стороны гидроцилиндров при торможении груза являются случайными величинами. Редкое событие характеризуется малой вероятностью его появления.

Определить величину вероятности в общем случае весьма сложно, т.к. необходимо знать закон распределения и функцию распределения вероятности. В общем случае математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение нагрузки могут быть определены в результате расчета на ЭВМ процесса нагружения за время одного типового цикла работы КМУ. Для расчета нагрузок по типовому циклу необходимо использовать соответствующую математическую модель, а полученные реализации обработать статистически. При определении числовых характеристик нагрузок КМУ требуется проведение большого объема вычислительных работ.

Разработанный способ вероятностной оценки нагрузок, когда усилие или момент выражается аналитической зависимостью от нескольких случайных параметров, заключается в том, что величина нагрузки выражается в следующем виде

$$F = M[F] + \gamma \sqrt{D[F]}, \quad (5)$$

где $M[F]$, $D[F]$ – соответственно математическое ожидание, дисперсия нагрузки; γ – коэффициент, величина которого зависит от закона распределения и от допустимого уровня вероятности не превышения случайной величиной значения F . Для нормального закона распределения случайной величины и уровня вероятности не превышения величины F равно 0,9973 коэффициент равен $\gamma = 3$.

В качестве функции нагрузки используется аналитическая зависимость момента на стрелах, полученная на основе упрощенной модели (одномассовой)

КМУ. В случае опускания и торможения груза стрелой зависимость максимально-го изгибающего момента имеет вид

$$M_{\text{изг}} = Lg(M_{\text{гр}} + M_{\text{стр}}) + VL\sqrt{Cv(M_{\text{гр}} + M_{\text{стр}})}, \quad (6)$$

где $M_{\text{гр}}$, $M_{\text{стр}}$ – масса груза, масса стрел статически приведенные к грузу; V – скорость груза перед торможением; L – максимальный вылет стрел; C – приведенная к грузу жесткость от сил сопротивления в гидроцилиндрах; $v = (M_{\text{гр}} + M_{\text{стр}})/(M_{\text{гр}} + \Delta M_{\text{стр}})$; $\Delta M_{\text{стр}}$ – динамически приведенная к грузу масса стрел.

Матожидания скорости груза и динамических усилий в гидроцилиндрах стрел определяются расчетным путем с соответствующим варьированием влияющих на них параметров. Для скорости путем изменения расхода рабочей жидкости. Для динамических усилий в гидроцилиндрах стрел путем изменения темпа торможения.

Диапазоны изменения параметров (скорости груза в момент торможения, силы сопротивления в гидроцилиндрах при торможении опускаемого груза на максимальном вылете) отражают влияние допусков настроек гидроаппаратуры (дросселей ограничителей расходов, предохранительных клапанов), а также скорости перемещения золотника гидрораспределителя из крайнего положения в нейтральное. Также эти матожидания могут быть определены экспериментально.

Диапазоны изменения и математические ожидания динамических усилий в гидроцилиндрах стрел можно определить на динамических испытаниях, изменяя темп торможения стрел и измеряя ускорение и перемещение груза. Аналогично можно определить реальные разбросы скорости груза перед торможением. Разброс величины массы груза, поднимаемого на максимальном вылете, можно определить только набором статистики.

В общем случае функция нагрузки $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ имеет нелинейную зависимость от случайных параметров КМУ x_1, x_2, \dots, x_n . Полагая случайные величины независимыми, дисперсию нагрузки можно определить по правилу линеаризации функции случайных величин, используя разложение в ряд Тейлора с сохранением только линейных членов (первого порядка)

$$D[F] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F(M[x_1], M[x_2], \dots, M[x_n])}{\partial x_i} \right)^2 D[x_i],$$

где $D[x_i]$, $M[x_i]$ – дисперсия, математическое ожидание параметра x_i .

В общем случае закон распределения случайных величин ($M_{\text{гр}}$, C , V) неизвестен. Как правило, на практике нормальный закон является предельным, к которому приближаются другие законы распределения случайных величин. Поэтому полагаем, что каждая их случайных величин ($M_{\text{гр}}$, C , V), в том числе и $M_{\text{изг}}$ распределены по нормальному закону.

После применения процедуры линеаризации к (6) и подставляя в (5) получим зависимость для момента

$$M_{\text{изг}} = Lg(k_{\text{гр}}M_{\text{гр}} + M_{\text{стр}}) + k_V VL\sqrt{k_C C_V(k_{\text{гр}}M_{\text{гр}} + M_{\text{стр}})} + \\ + \sqrt{(1 - k_{\text{гр}})^2 M_{\text{гр}}^2 \left(g^2 L^2 + k_V^2 V^2 \frac{1}{4} \frac{k_C C}{k_{\text{гр}}M_{\text{гр}} + M_{\text{стр}}} + g^2 L^2 k_V V \sqrt{\frac{k_C C}{k_{\text{гр}}M_{\text{гр}} + M_{\text{стр}}}} \right) + \\ + (1 - k_C)^2 C^2 k_V^2 V^2 \frac{1}{4} \frac{k_{\text{гр}}M_{\text{гр}} + M_{\text{стр}}}{k_C C} + (1 - k_V)^2 V^2 k_C C_V(k_{\text{гр}}M_{\text{гр}} + M_{\text{стр}})},$$

где $k_V = M[V]/V_{\text{max}}$; $k_C = M[C]/C_{\text{max}}$; $k_{\text{гр}} = M[M_{\text{гр}}]/M_{\text{гр max}}$.

Математическое ожидание случайных параметров могут приниматься ориентировочно в диапазоне 0,6–0,8 от максимальных величин. Для расчетов необходимы обоснованные значения математических ожиданий таких параметров как скорость опускания груза, усилия сопротивления в гидроцилиндрах, массы грузов. Значения $k_{\text{гр}}$ принимаются из данных статистики по величинам масс грузов, поднимаемых КМУ на максимальном вылете. При отсутствии этих данных можно принять значение $k_{\text{гр}} = 0,75$, соответствующее среднему коэффициенту нагружения для самого тяжелого класса нагружения кранов Q₄.

На основе полученных зависимостей были проведены расчетные оценки изгибного момента для возможных вариантов разбросов случайных величин КМУ "Синегорец-75":

- 1) если $k_{\text{гр}} = k_C = 0,75$, то $M_{\text{изг}}/M_{\text{max}} = 0,93$;
- 2) если $k_{\text{гр}} = 0,75$, $k_C = 0,6$, то $M_{\text{изг}}/M_{\text{max}} = 0,9$;
- 3) если $k_{\text{гр}} = k_C = k_V = 0,75$, то $M_{\text{изг}}/M_{\text{max}} = 0,9$.

Таким образом, учет случайного характера параметров при принятых коэффициентах разброса случайных параметров и величины вероятности не превышения снижает максимальный расчетный изгибающий момент на стрелах на 7–10%.

Предложенный вероятностный способ оценки нагрузок защищен патентом №2194258. Данный способ предложен впервые в отрасли, поэтому требуются уточнения, подтверждения, набор статистики. При оценке прочности для экстремальных и вероятностных величин нагрузок необходимо использовать различные значения коэффициентов безопасности (запасов прочности). Коэффициенты безопасности для крайних режимов должны быть снижены т.к. реализация крайних режимов является редким событием.

В третьей главе приведены программа, методика и результаты экспериментальных исследований на натурном образце КМУ нагруженности конструкций стрел и их гидроприводов при переходных режимах работы. Динамические испытания натурного образца "Синегорец-75" проводились на специально разработанном и изготовленном испытательном стенде предприятия ЗАО "НК Уралтерминалмаш" (рис. 7) в соответствии с разработанной методикой проведения динамических испытаний.

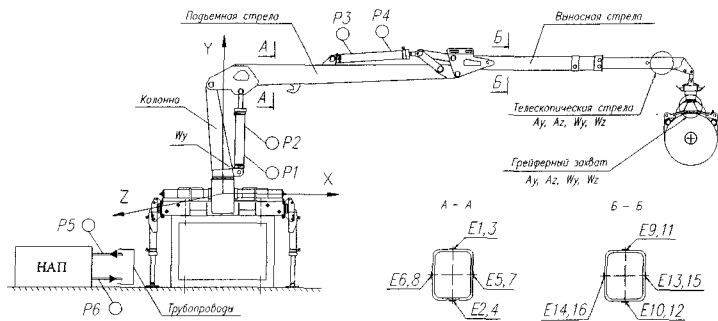


Рис. 7. Испытательный стенд и схема установки средств измерений:
 P1...P6 – датчики давлений; Ay, Az – датчики ускорений;
 E1...E16 – датчики деформаций; Wy, Wz – датчики угловых скоростей

В ходе нагружения КМУ измерялись деформации стрел, угловые скорости стрел и колонны, линейные ускорения мерного груза, давления в гидроцилиндрах и других элементах гидросистемы. На КМУ были смонтированы соответствующие средства измерения и контрольно-измерительная аппаратура. Для заедывания гидросистемы КМУ использовался насосный агрегат питания (НАП), с приводом от электродвигателя. Насос обеспечивал на входе в гидросистему постоянный расход рабочей жидкости 60 л/мин и давление 16 МПа.

Датчики деформаций (тензодатчики) были установлены в наиболее нагруженных сечениях на стрелах, так что одни датчики были чувствительны к воздействию нагрузок в вертикальном направлении, а другие – в поперечном направлении. Перед испытаниями в процессе статической тарировки тензодатчиков головку стрелы нагружали статической нагрузкой. Нагружение осуществлялось от нуля до максимума с фиксацией показаний датчиков и определением тарировочных кривых в каждом сечении. При этом нагружение в вертикальной плоскости осуществлялось мерным грузом, удерживаемым грейферным захватом, нагружение в горизонтальной плоскости путем приложения к головке стрелы заданной горизонтальной силы.

Динамическое нагружение конструкции КМУ осуществлялось путем перемещения и торможения груза в вертикальном направлении и в поперечном направлении. В процессе испытаний воспроизводились три режима нагружения КМУ: опускание и торможение груза подъемной стрелой; опускание и торможение груза выносной стрелой; поворот и торможение груза колонной.

Экспериментальными исследованиями установлено следующее (рис. 8): наибольшие динамические нагрузки возникают при торможении опускающейся подъемной стрелы с грузом; высокочастотные колебания затухают практически в течение 0,5–1,0 периода низкочастотных колебаний; наибольшие нагрузки реали-

зуются в течение первого колебания низшей частоты; основные амплитуды колебаний нагрузок происходят на нескольких низших частотах.

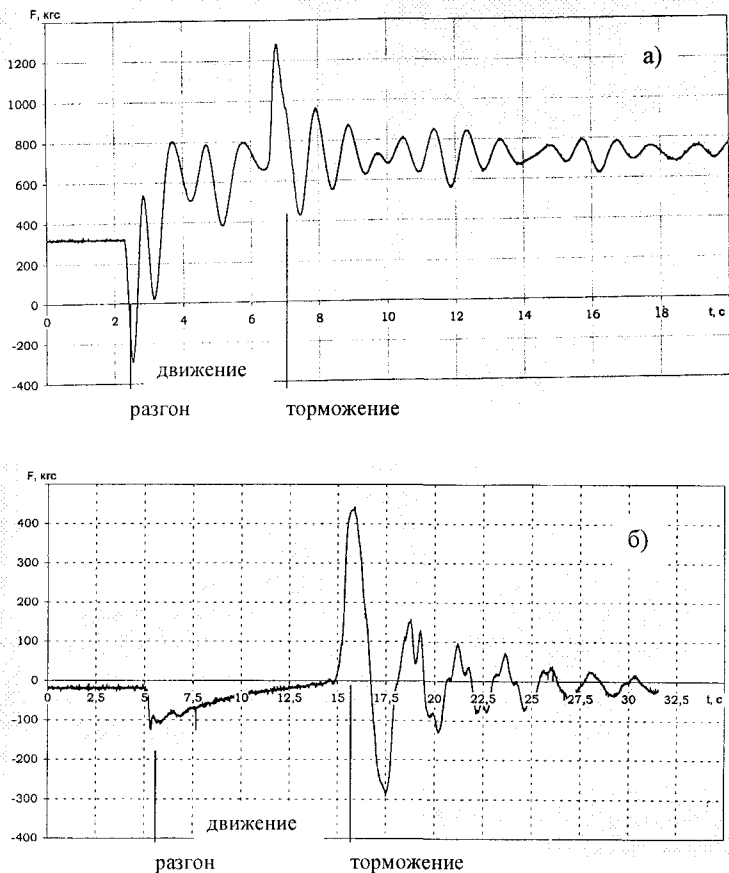


Рис. 8. Динамическое усилие на подъемной стреле:
а – случай действия вертикальных нагрузок;
б – случай действия горизонтальных нагрузок

В приложения вынесены фотографии динамических испытаний натурального образца КМУ "Синегорец-75", алгоритм определения силовой характеристики гидроприводов стрел и описание конечно-элементной модели "Синегорец-75".

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан стандарт предприятия "Краны-манипуляторы грузоподъемные. Нормы прочности" (ЗАО "НК Уралтерминалмаш") в котором обобщены основные положения для расчетов динамических нагрузок и определены расчетные случаи нагружения КМУ (кинематические положения стрел) с учетом особенностей условий эксплуатации и конструкции.

2. Разработаны математические модели и методика расчета динамических нагрузок при переходных режимах работы КМУ с учетом влияния упругих деформаций стрел и особенностей гидроприводов стрел (податливостей рабочей жидкости и элементов гидропривода, характеристик предохранительных клапанов). Эффективность и достоверность методики подтверждена динамическими испытаниями натурального образца КМУ "Синегорец-75". Расхождение между экспериментальными и расчетными данными составляет менее 5%.

3. На основе упрощенной модели (одномассовой) разработан и защищен патентом способ определения динамических нагрузок, позволяющий учитывать влияние случайного характера отклонений от средних величин массы груза, скорости груза и динамических усилий в гидроцилиндрах стрел. Учет случайных отклонений этих параметров для КМУ "Синегорец-75" позволили уменьшить на 7–10% максимальный расчетный изгибающий момент на стрелах.

4. С использованием разработанных методик проведены расчеты и анализ динамических нагрузок КМУ "Синегорец" грузоподъемностью 25, 75, 110, 130 и 210 кН·м на основании которых проведены расчеты на прочность и разработана проектно-конструкторская документация, разработаны конструкция грузоподъемной стрелы "Синегорец-210" и механизм подъема аутригера, защищенные патентами.

5. С целью нормирования величин коэффициентов безопасности необходимо дальнейшее исследование влияния рассеивания эксплуатационных факторов на нагруженность КМУ.

6. Разработанные положения и методики расчета нагруженности КМУ могут быть использованы на машиностроительных предприятиях, изготавливающих КМУ, а также при решении аналогичных задач в других областях техники.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

1. Сагдеев К.Б. Метод определения динамических нагрузок манипулятора// Сборник докладов и материалов I-го семинара Сибирского научно-исследовательского института имени С.А. ЧАПЛЫГИНА. "Проблемы развития гидропривода в различных отраслях промышленности". – Новосибирск: СИБНИИ, 2003. – С. 28–29.

2. Метод расчета динамической нагруженности крано-манипуляторной установки/ К.Б. Сагдеев, В.С. Мошкин, А.Б. Оконьский, И.С. Смолкин// XXIV Рос-

сийская школа по проблемам науки и технологий. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – С. 166–169.

3. Экспериментальное исследование динамической нагруженности крано-манипуляторной установки/ К.Б. Сагдеев, В.С. Мошкин, А.Б. Оконьский, И.С. Смолкин// XXIV Российская школа по проблемам науки и технологий. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – С. 169–172.

4. Сагдеев К.Б., Павлюк Ю.С. Специальные крано-манипуляторные установки: Учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 74 с.

5. Патент на изобретение №2116210. Аутриггер/ К.Б. Сагдеев, В.С. Мошкин, А.Б. Оконьский и др. – 1998. – 18 с.

6. Патент на изобретение №2194258. Способ определения динамических сил/ К.Б. Сагдеев, В.С. Мошкин, И.С. Смолкин и др. – 2002. – 14 с.

7. Патент на изобретение №2240973. Грузоподъемная стрела крано-манипуляторной установки/ К.Б. Сагдеев, В.С. Мошкин, И.С. Смолкин и др. – 2002. – 62 с.