

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ СТРЕЛЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВНЕЗАПНОГО СНЯТИЯ НАГРУЗКИ

Потахов Е.А., к.т.н. Ватулин Я.С.

Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия
epotakhov@mail.ru

В настоящее время при выполнении строительных, погрузо-разгрузочных и монтажных работ широкое применение находят самоходные стреловые краны, оснащенные телескопическим стреловым оборудованием. Аварии самоходных стреловых кранов, вызванные внезапным обрывом грузового каната, а также самопроизвольной расстроповкой груза, можно отнести к основным причинам аварий грузоподъемных кранов. Данную причину можно считать одной из наиболее опасных, так как внезапное снятие нагрузки характеризуется непредсказуемостью, независимостью от квалификации оператора и быстротечностью воздействия. Целью работы является изучение нагружения телескопического стрелового оборудования при внезапном снятии нагрузки и предложение мер предотвращения или снижения последствий аварий, вызванных данным видом нагружения. В качестве объекта исследования выбран железнодорожный кран «Сокол 80.01М». В качестве методов исследования используется метод численного эксперимента, проведенный в модуле комплексного динамического и кинематического анализа механизмов SolidWorks Motion. В результате численного моделирования мгновенного снятия нагрузки установлено балансирование ТС на плитах скольжения и ударные взаимодействия секций стрелы; определены временная зависимость реакций опор скольжения, величины ударных взаимодействий и временная зависимость колебаний оголовка стрелы. Предлагается применять на самоходных стреловых кранах «Способ повышения безопасности и систему безопасности стрелового грузоподъемного крана», которые помимо защиты грузоподъемного крана от перегрузки и от столкновений его стрелы или грузозахватного органа с различными препятствиями (координатная защита), вследствие наличия пиропатронов и подсистемы управления ими, обеспечивают предотвращение аварий в случае внезапного снятия нагрузки со стрелы, а также защиту грузоподъемной машины при воздействии случайных внешних факторов, снижение ущерба при необратимой потере устойчивости крана. Установлены наиболее рациональные параметры устройства аварийно-силового воздействия на стреловое оборудование: время действия пиропатронов; коэффициент действия пиропатронов, начальная сила пиропатронов, сила заряда устройства аварийно-силового воздействия на стреловое оборудование.

Ключевые слова: телескопическая стрела, Сокол 80.01М, пиропатрон, внезапное снятие нагрузки.

Введение

В настоящее время наибольшее применение при проведении строительных, погрузо-разгрузочных и монтажных работ находят самоходные стреловые краны (ССК), оснащенные телескопическим стреловым оборудованием [1].

Телескопическая стрела (ТС) представляет собой стержневую консольную конструкцию переменной жесткости, которая образована из сопрягаемых одной корневой (неподвижной) и нескольких подвижных секций, каждая последующая из которых смонтирована во внутрь предыдущей. Каждая подвижная секция опирается на опорные элементы, одна часть которых

установлена в верхней задней части внутренней секции, а другая – в нижней передней части внешней секции. От бокового смещения секции удерживаются боковыми упорами.

Стальные канаты относятся к основным элементам конструкции грузоподъемных кранов различных типов. Состояние канатов в значительной степени определяет уровень безопасности крана в целом. При эксплуатации крана на канаты действуют переменные механические нагрузки разного рода (растяжение, изгиб, скручивание, динамические нагрузки), а также факторы окружающей среды: переменная влажность, перепады температур,

запыленность, пары агрессивных веществ. В результате таких воздействий происходит накопление усталости проволок каната, возникает абразивный износ и коррозионные поражения, уменьшающие поперечное сечение каната по металлу, и как следствие, снижается его прочность [2].

Аварии ССК, вызванные внезапным обрывом грузового каната, а также самопроизвольной расстроповкой груза, можно отнести к основным причинам аварий грузоподъемных кранов [3; 4]. Данную причину можно считать одной из наиболее опасных, так как внезапное снятие нагрузки характеризуются непредсказуемостью, независимостью от квалификации оператора и быстротечностью воздействия.

Актуальность исследования критических режимов нагружения стрелового оборудования вызвано не только критериями безопасной эксплуатации машины, но и экономическими критериями, так как ТС является одним из наиболее дорогостоящих элементов ССК [5].

Работ, посвященных внезапному снятию нагрузки со стрелового оборудования кранов [6; 7; 8; 9; 10], крайне мало, и в существующих исследованиях не предлагается решений по предотвращению заброса стрелового оборудования, вызванного мгновенным снятием нагрузки.

Задачей исследования является исследование нагружения телескопического стрелового оборудования при внезапном снятии нагрузки и предложение мер предотвращения или снижения последствий аварий, вызванных мгновенным снятием нагрузки.

В качестве объекта исследования выбран железнодорожный кран «Сокол 80.01М», оснащенный телескопическим стреловым оборудованием; механизм перемещения секций ССК включает два поршневых гидроцилиндра двухстороннего действия. Исследование проводится при опорном контуре с максимально выдвинутыми аутригерами, наибольшей длине стрелы (25 м), максимальном угле подъема ($49^{\circ}20'$) и соответствующем этим параметрам вылете (13 м) и грузоподъемности (25 т), так как данный режим работы крана является одним из наиболее опасных.

Натурные исследования грузоподъемных кранов, связанные с доведением крановой установки до предельного состояния, представляют большие трудности, поскольку предполагают снижение ресурса оборудования,

повышенную производственную опасность и значительные материальные затраты. В связи с этим, с целью определения нагружения узлов и элементов ССК в предельном состоянии наиболее целесообразно применить методику численного эксперимента. В частности, в научной и инженерной практике для изучения строительно-дорожных машин широкое применение получило численное моделирование при использовании систем автоматизированного инженерного анализа [11].

Компьютерное моделирование осуществляется в среде специализированного функционала *Motion* (комплексный динамический и кинематический модуль) программного комплекса *SolidWorks*.

Численное моделирование включает два этапа. На первом этапе виртуального моделирования создается численная модель объекта, идентичная по своим наиболее значимым характеристикам объекту исследования. На втором проводится численный эксперимент с целью исследования объекта в условиях определенного нагружения. Создание виртуальной модели ССК было описано в работе [9].

Нагружение ТС при внезапном снятии нагрузки

Виртуальный эксперимент внезапного снятия нагрузки с телескопического стрелового оборудования проводится в среде *Motion SolidWorks* следующим образом: модель ССК установлена на грунтовом основании; к направляющему блоку оголовка ТС приложена сила, имитирующая действие веса груза на гибком подвесе. Из трех существующих способов приложения сил (нагрузка, возрастающая по линейному закону; нагрузка, приложенная мгновенно и кратковременно), характерных для конструкций подъемно-транспортных машин [12], для процесса подъема груза выбрана нагрузка, возрастающая в течение времени 2,5 секунд (время развития нагрузки) до наибольшего значения (грузоподъемность в 25 тонн) по линейному закону. Снятие нагрузки моделируется прерыванием действия силы в момент времени 4,0 секунды (рис. 1).

В процессе подъема и перемещения груза ТС находится в напряженно-деформированном состоянии (НДС) и обладает потенциальной энергией упругой деформации (положение 1). При мгновенном снятии нагрузки высвобожденная потенциальная энергия ТС преобра-

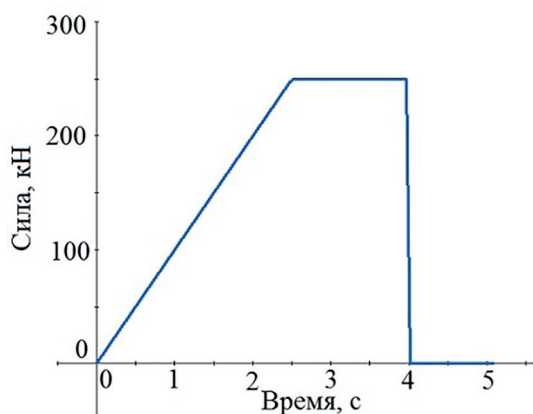


Рис. 1. График действия внешней нагрузки на ТС

зается в кинетическую энергию заброса, направленную в сторону уменьшения вылета [6; 7]. В процессе первого заброса происходит максимальное отклонение ТС (положение 2) от начального положения (положение 1). Далее ТС, выведенная из положения равновесия, в результате периодического преобразования кинетической энергии заброса в потенциальную энергию упругой деформации ТС и наоборот, а также сил диссипации, совершает затухающие колебания относительно оси ТС (рис. 2).

При проведении численного эксперимента определено, что в процессе подъема груза изменению реакций опор скольжения (рис. 3, а) и положения оголовка ТС (рис. 4, а) на начальном этапе свойственен динамический колебательный характер, что не противоречит исследованиям динамики гидравлического автомобильного крана МКА-25, оснащенного ТС, [13], где установлено, что в процессе подъема

груза, а также при торможении опускающегося груза имеют место колебания груза и стрелы в вертикальной плоскости и динамические нагрузки в канате полиспаста подъема груза.

В результате проведенного моделирования внезапной разгрузки установлено, что колебательный процесс ТС, обусловленный мгновенным снятием нагрузки, сопровождается поочередным опиранием на опоры скольжения (соответствует положению 3; 5; 7; 9...) и отрывом от них (положения 2; 4; 6; 8...). Вследствие чего, опоры скольжения испытывают циклический постепенно снижающийся по величине процесс нагружения (рис. 3, а). Первые два колебания, соответствующие первым и наибольшим кинетическим энергиям заброса, характеризуются ударными взаимодействиями внутренних секций о внешние в точках: А (в момент времени 4,28 и 4,84 сек), В (4,28 и 4,84 сек), С (4,25 и 4,8 сек), D (4,25 и 4,8 сек); первые удары соответствуют 2-му положению ТС, а вторые – 4-му (рис. 2, рис. 5). Положения 6; 8... соответствуют отрыву секций от опорных элементов, но без ударных взаимодействий между секциями.

Способ предотвращения заброса ТС при внезапном снятии нагрузки

Для предотвращения или снижения последствий аварий, возникших в результате внезапного снятия нагрузки со стрелового оборудования, предлагается «Способ повышения безопасности и система безопасности стрелового грузоподъемного крана» [14].

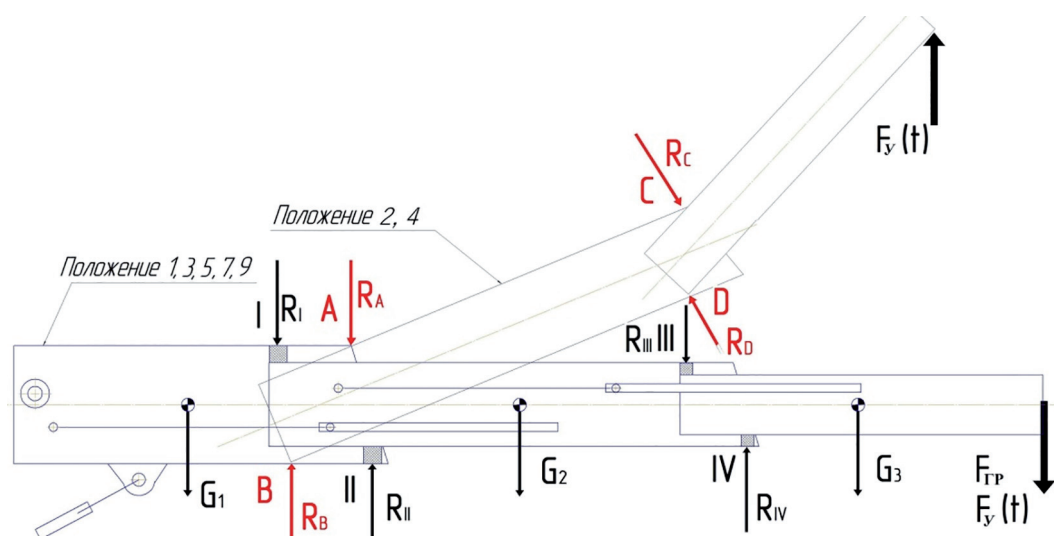


Рис. 2. Расчетная схема ТС после внезапного снятия нагрузки для наиболее нагруженных положений:

F_y – силы упругости; $R_A - R_D$ – силы удара; I–IV – опоры скольжения; $R_I - R_{IV}$ – реакции опор скольжения; $G_1 - G_3$ – силы тяжести секций стрелы; $F_{ГР}$ – вес груза

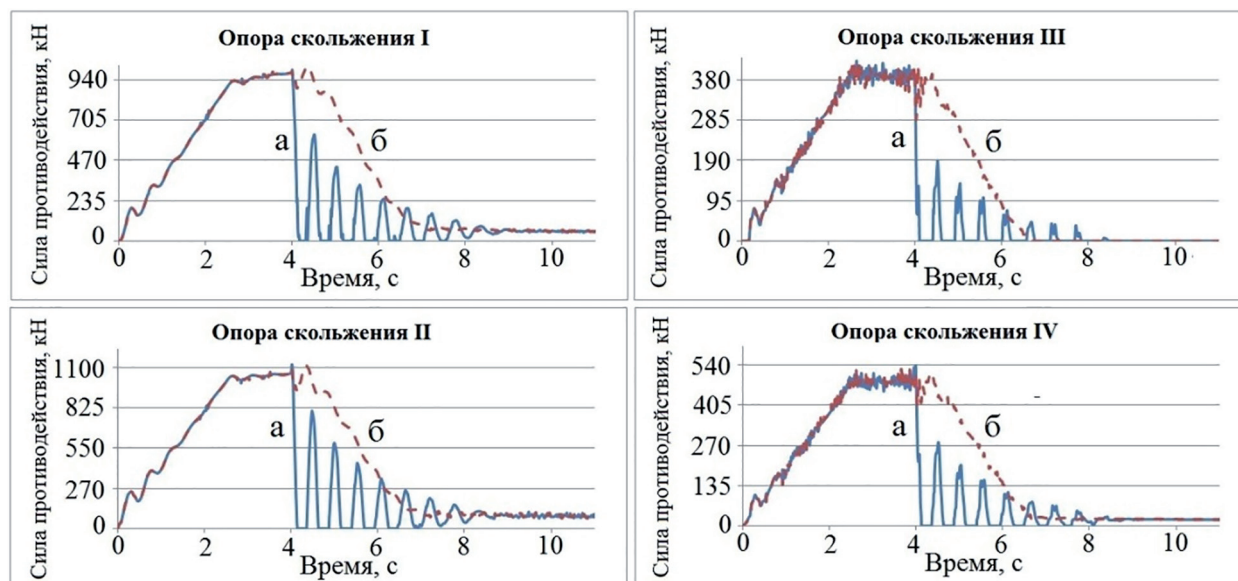


Рис. 3. Реакции опор скольжения при внезапном снятии нагрузки с ТС:
 а – без предотвращения заброса; б – при предотвращении заброса ($K_{II} = 1,0$; $t_{II} = 3$)

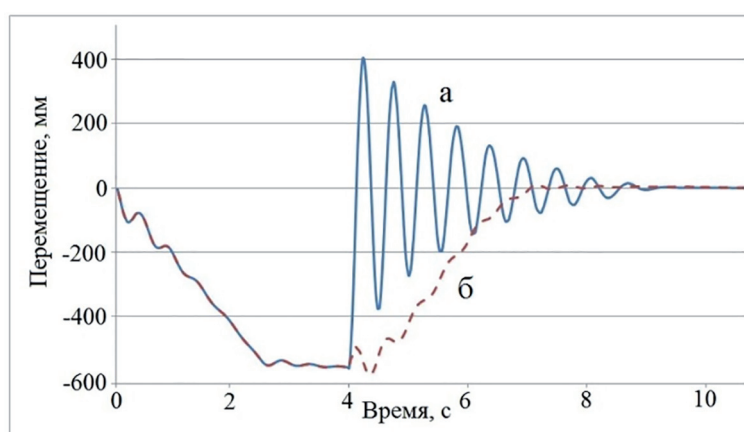


Рис. 4. Перемещение оголовка ТС в направлении силы тяжести:
 а – без предотвращения заброса; б – при предотвращении заброса ($K_{II} = 1,0$; $t_{II} = 3$)

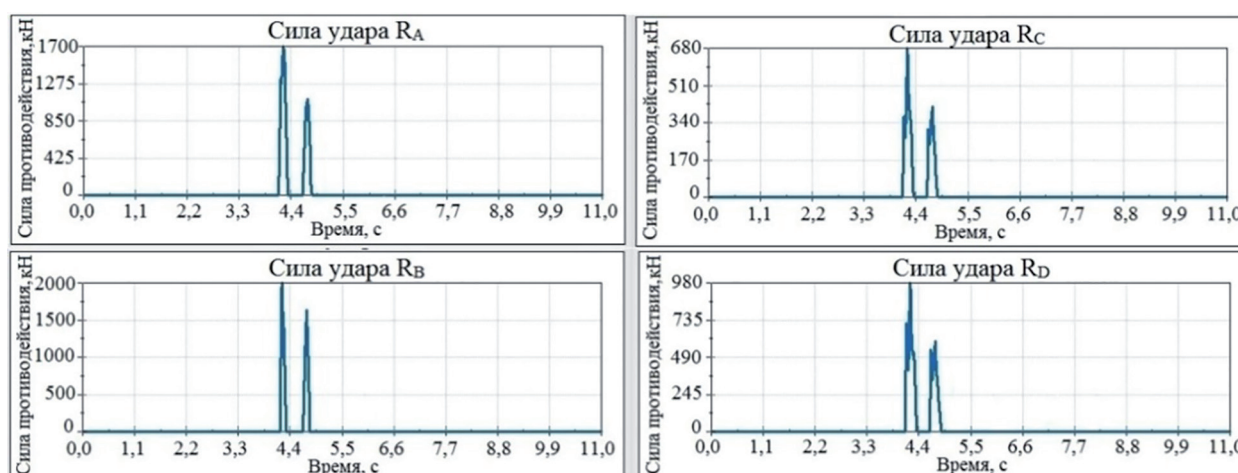


Рис. 5. Временная зависимость сил удара между секциями

Система безопасности стрелового грузоподъемного крана (рис. 6) содержит цифровой вычислитель, датчики параметров работы крана, выходное устройство, органы управления грузоподъемного крана, приводы исполнительных механизмов, устройство аварийно-силового воздействия на стреловое оборудование – пиропатроны. Датчики параметров работы крана, выходное устройство и органы управления грузоподъемного крана соединены с цифровым вычислителем при помощи отдельных проводов и/или мультиплексной линии связи (CAN, LIN и т.п.).

Цифровой вычислитель включает в себя микроконтроллер, к которому подключены органы управления вычислителем, индикаторы (светодиодные, символьные жидкокристаллические, акустические и т.п.), запоминающее устройство (микросхемы *Flash*-памяти) и устройство ввода/вывода информации.

В состав датчиков параметров работы крана в общем случае могут входить датчик нагрузки грузоподъемного крана, выполненный в виде

датчика усилия в грузовом и/или стреловом канате и/или датчика давления в гидроцилиндре подъема и/или телескопирования стрелы, датчик ускорения, гироскоп, закрепленные на оголовке стрелы, а также датчик угла наклона стрелы.

Выходное устройство выполнено, в частности, в виде силового электронного блока с дискретными, пропорциональными или широтно-импульсными выходными сигналами. Также выходное устройство может быть выполнено на основе микроконтроллера и может содержать электромагнитные пускатели или электромагнитные клапаны, включенные в гидравлическую или электрическую систему управления краном.

Устройство аварийно-силового воздействия на стреловое оборудование – пиропатроны 6 выполнено в виде минимум двух прямоточных реактивных двигателей, установленных в верхней части оголовка стрелы, ориентированных выходными соплами в плоскости качания стрелы: первый, соответственно, в направлении

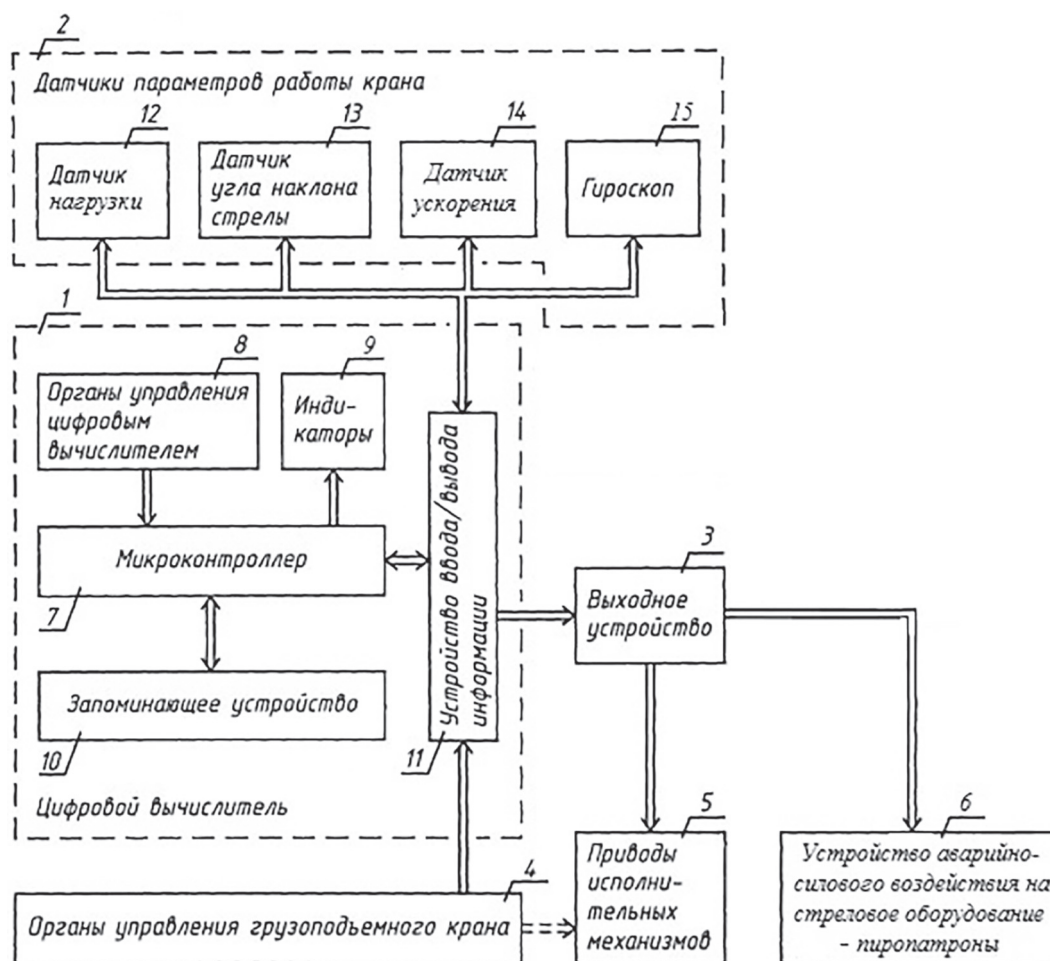


Рис. 6. Схема системы безопасности стрелового грузоподъемного крана

возможного опрокидывания грузоподъемного крана стрелой вперед (потеря грузовой устойчивости), второй – в направлении возможного опрокидывания грузоподъемного крана стрелой назад (потеря собственной устойчивости, внезапное снятие нагрузки со стрелы) и оснащенных, например, емкостью с водой, предназначенной для создания удерживающего импульса паро-реактивной струи. Устройство аварийно-силового воздействия на стреловое оборудование – пиропатроны 6 соединены при помощи отдельных проводов и/или мультиплексной линии связи с выходным устройством.

Управление (пуск, остановка и/или регулирование скорости) приводами исполнительных механизмов осуществляется с помощью органов управления грузоподъемного крана, воздействующих на приводы исполнительных механизмов непосредственно (ручное управление) или через цифровой вычислитель (автоматизированное управление). Управление устройством аварийно-силового воздействия на стреловое оборудование – пиропатронами осуществляется только автоматизировано.

Система безопасности стрелового грузоподъемного крана работает следующим образом.

Перед началом работы грузоподъемного крана при помощи органов управления и цифрового вычислителя в память микроконтроллера вводятся параметры, определяющие геометрию, условия или режим работы крана: положение выдвижных опор, кратность запасаковки грузового полиспаста, наличие, длину и угол наклона гуська и т.д., если для данной конструкции крана ввод этих параметров является необходимым. Введенные параметры сохраняются в энергонезависимом запоминающем устройстве или в памяти (в постоянном запоминающем устройстве) микроконтроллера.

Зона допустимых значений положения стрелового оборудования крана вводится при задании параметров координатной защиты при помощи органов управления грузоподъемного крана и также сохраняется в памяти микроконтроллера или в запоминающем устройстве. В этой же памяти хранятся предельно допустимые значения параметров, характеризующих нагрузку или пространственное положение стрелы или грузозахватного органа крана и представленных, например, в виде его грузовых характеристик, изменением ускорения оголовка ТС, усилия в грузовом и/или стреловом канате, и/или давления в гидро-

цилиндре подъема, и/или телескопирования стрелы.

Изменение ускорения было отнесено к параметрам, характеризующим нагрузку крана, и выбрано в качестве критерия активации исполнительных устройств, предотвращающих аварию и подавляющих заброс стрелового оборудования при внезапном снятии нагрузки, так как момент возникновения данного вида нагружения характеризуется резким и значительным увеличением ускорения оголовка стрелы [8; 9].

Инициирование управления приводами исполнительных механизмов осуществляется путем перемещения рукояток, рычагов и подобных органов управления грузоподъемного крана. Уровни сигналов управления приводами исполнительных механизмов определяются микроконтроллером либо формируются путем ограничений управляющих воздействий оператора на органы управления грузоподъемного крана.

Микроконтроллер работает по программе, записанной в его памяти или в запоминающем устройстве, и через устройство ввода/вывода информации по мультиплексному каналу обмена данными или по отдельным линиям связи получает измеренные данные от датчиков параметров работы крана, на основании которых микроконтроллер определяет пространственное положение механизмов и нагрузку крана. Для определения текущих значений параметров, характеризующих нагрузку крана и/или текущее положение его стрелы или грузозахватного органа, в общем случае используется математическая модель крана, записанная в памяти микроконтроллера или в запоминающем устройстве.

Далее микроконтроллер осуществляет сравнение текущих значений параметров, характеризующих нагрузку и пространственное положение стрелы или грузозахватного органа крана с допустимыми значениями этих параметров и формирует в зависимости от результатов этого сравнения предупредительные сигналы для оператора, поступающие на индикаторы, а также сигналы управления или блокирования управления приводами исполнительных механизмов, обеспечивающие предотвращение превышения допустимых значений этих параметров. Благодаря этому осуществляется защита крана от перегрузки и от столкновений с препятствиями (координатная защита).

В случае превышения параметров, характеризующих нагрузку или пространственное положение стрелы или грузозахватного органа крана, микроконтроллер формирует сигналы, активирующие устройство аварийно-силового воздействия на стреловое оборудование – пиропатроны, кроме того, в зависимости от текущих значений параметров работы (например, вылета, угла наклона стрелы, веса груза) микроконтроллер вычисляет необходимую величину реактивного заряда и управляет его изменением.

При внезапном снятии нагрузки со стрелового оборудования, характеризующемся резким увеличением ускорения оголовка стрелы и превышением предельно допустимого значения его изменения, реактивное действие устройства аварийно-силового воздействия на стреловое оборудование – пиропатронов направлено на подавление заброса стрелы и приведение ее в начальное положение до нагружения.

В случае превышения параметров, характеризующих нагрузку и/или пространственное положение стрелы и/или грузозахватного органа крана, соответствующих необратимой потере устойчивости, которая может наступить, например, вследствие действия случайных внешних факторов, например, просадки опор, реактивное действие устройства аварийно-силового воздействия на стреловое оборудование – пиропатронов направлено на увеличение времени процесса потери устойчивости крана.

При вычислении текущего значения параметра, характеризующего нагрузку и/или пространственное положение стрелы и/или грузозахватного органа крана, микроконтроллер использует информацию о длине телескопируемой стрелы. Длина стрелы вычисляется микроконтроллером на основании результатов измерений датчиков параметров работы крана, например, с использованием записанной в запоминающем устройстве функциональной зависимости этой длины от центробежного ускорения последней выдвижной секции стрелы, измеряемого посредством прикрепленного к ней датчика ускорения, и угловой скорости стрелы, измеряемой посредством гироскопа.

Настройка характеристик пиропатронов

Настройка характеристик устройства аварийно-силового воздействия на стреловое

оборудование осуществляется при численном моделировании аварийной ситуации. В качестве параметров пиропатронов выбрано: время действия пиропатронов (t_{Π}), направленного на предотвращение заброса и затухания колебаний стрелового оборудования; коэффициент действия пиропатронов (K_{Π}), начальная сила пиропатронов (F_{Π}), сила заряда устройства аварийно-силового воздействия на стреловое оборудование (F_{Π}). Начальная сила пиропатронов определяется как:

$$F_{\Pi} = K_{\Pi} \cdot F_{\Gamma},$$

где F_{Γ} – сила тяжести груза, Н.

Сила заряда устройства аварийно-силового воздействия:

$$F_{\Pi}(t) = F_{\Pi} - \Delta F_{\Pi} \cdot t,$$

где: ΔF_{Π} – изменение силы заряда, Н/сек; $t = [0; t_{\Pi}]$.

Выбрано, что сила заряда пиропатронов равномерно уменьшается до нуля в процессе времени действия; тогда изменение силы заряда:

$$\Delta F_{\Pi} = F_{\Pi} / t_{\Pi}.$$

В результате проведения серии компьютерных экспериментов внезапного снятия нагрузки с действием пиропатронов при постоянном коэффициенте пиропатронов ($K_{\Pi} = 1$) было определено ориентировочное наиболее рациональное время действия пиропатронов для выбранных параметров ТС «Сокола 80.01М» (вылет, длина, грузоподъемность), равное 3 сек. (рис. 7, а). Установлено, при $t_{\Pi} < 3$ секунд наблюдается колебательный характер затухания, что неблагоприятно влияет на нагружение ТС; при $t_{\Pi} \geq 3$ происходит монотонное затухающее движение ТС.

С целью определения ориентировочной универсальной величины t_{Π} для любого набора параметров ТС (длина секций, площадь поперечного сечения секций, угол подъема, вылет стрелы и др.) установлена зависимость t_{Π} от жесткости ТС:

$$t_{\Pi} = C_{ТС} / C_{\Pi},$$

где $C_{ТС}$ – жесткость любой ТС, кН/м; C_{Π} – жесткостной коэффициент пиропатрона, выражающий величину жесткости стрелового оборудования, приходящуюся на 1 секунду действия пиропатрона, кН/м сек.

Жесткость ТС крана «Сокол 80.01М» при выбранных параметрах стрелового обо-

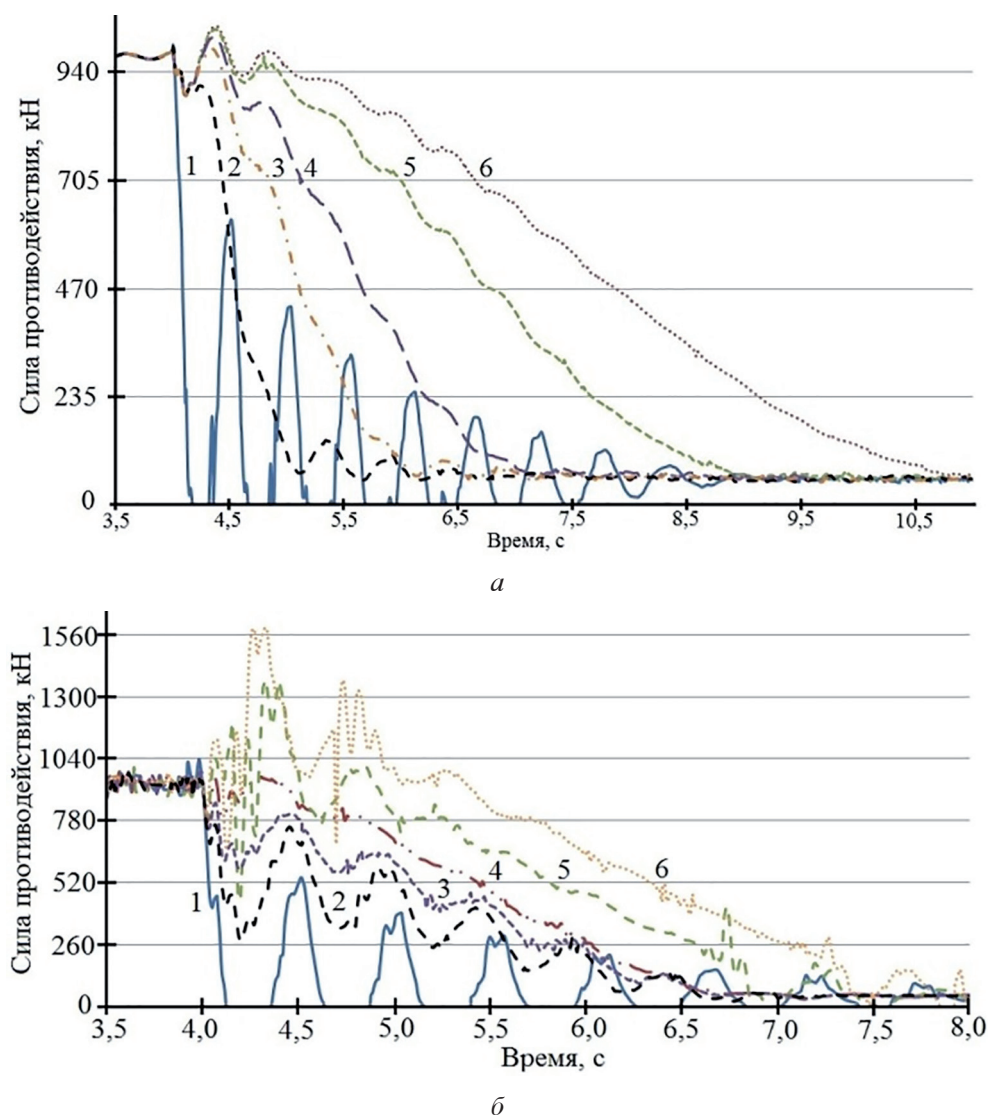


Рис. 7. Реакции опор скольжения I при внезапном снятии нагрузки с ТС «Сокола 80.01М» (длина ТС – 25 м, угол подъема – 49°20′, вылет – 13 м, грузоподъемность – 25 т) с предотвращением заброса при различных параметрах пиропатронов:

- а) выбор параметров пиропатронов при $K_{\Pi} = 1,0$: 1 – реакции опор без предотвращения заброса, 2 – реакции опор при $t_{\Pi} = 1$ сек, 3 – реакции опор при $t_{\Pi} = 2$ сек, 4 – реакции опор при $t_{\Pi} = 3$ сек, 5 – реакции опор при $t_{\Pi} = 5$ сек, 6 – реакции опор при $t_{\Pi} = 7$ сек; б) выбор параметров пиропатронов при $t_{\Pi} = 3,0$ сек: 1 – реакции опор без предотвращения заброса; 2 – реакции опор при $K_{\Pi} = 0,6$; 3 – реакции опор при $K_{\Pi} = 0,8$; 4 – реакции опор при $K_{\Pi} = 1,0$; 5 – реакции опор при $K_{\Pi} = 1,2$; 6 – реакции опор при $K_{\Pi} = 1,4$

рудования приближенно установим из Закона Гука:

$$C_{TC} = F_{\Gamma}/y = 250000 \text{ Н}/0,5485 \text{ м} \approx 455,79 \text{ кН/м},$$

где y – перемещение оголовка ТС в направлении силы тяжести в результате действия груза, м. Перемещение оголовка было установлено из эпюры перемещений, полученной в результате проведения прочностного анализа конструкции методом конечных элементов в модуле *Simulation SolidWorks*.

Зная жесткость ТС и время действия пиропатронов для выбранных параметров стрелы

вого оборудования и типа ССК, постоянный жесткостной коэффициент пиропатрона можно определить как:

$$C_{\Pi} = C_{TC}/t_{\Pi} = (455,79 \text{ кН/м})/3 \text{ сек} = 151,93 \text{ кН/м·сек}.$$

В результате проведения серии компьютерных экспериментов внезапного снятия нагрузки с действием устройства предотвращения заброса при постоянном времени действия пиропатронов ($t_{\Pi} = 3$) и при различных параметрах ТС был определен наиболее рациональный коэффициент действия пиропатронов, равный 1,0

(рис. 7, б), который можно распространить на любой набор характеристик ТС. Установлено, при $K_{\Pi} < 1,0$ наблюдается колебательный характер затухания движения ТС, а при $K_{\Pi} > 1,0$ характеризуется увеличением реакций опорных элементов ТС, что негативно влияет на нагружение стрелового оборудования.

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что для защиты крана от внезапного снятия нагрузки ориентировочными наиболее рациональными параметрами пиропатронов для выбранных характеристик ТС являются: $K_{\Pi} = 1,0$; $t_{\Pi} = 3$ с, сравнение нагружения опорных элементов ТС и перемещений оголовка стрелового оборудования «Сокола 80.01М» без предотвращения заброса и при предотвращении заброса с выбранными параметрами пиропатрона представлено на рис. 3, б; 4, б. Установлено, при действии устройства аварийно-силового воздействия на стреловое оборудование не происходит ударных взаимодействий секций; нагружение опор скольжения и движение ТС характеризуется монотонным затуханием.

Выводы

В результате численного моделирования определены особенности нагружения ТС при внезапном снятии нагрузки: наблюдается балансирование ТС на плитах скольжения и ударные взаимодействия секций стрелы; установлены временная зависимость реакций опор скольжения и движения оголовка ТС, величины ударных взаимодействий.

На самоходных стреловых кранах предлагается использовать «Способ повышения безопасности и систему безопасности стрелового грузоподъемного крана от перегрузки и от столкновений его стрелы или грузозахватного органа с различными препятствиями (координатная защита), вследствие наличия пиропатронов и подсистемы управления ими, обеспечивают предотвращение аварий в случае внезапного снятия нагрузки с ТС, а также защиту грузоподъемного средства при воздействии случайных внешних факторов, снижение ущерба при необратимой потере устойчивости крана.

Установлены наиболее рациональные параметры устройства аварийно-силового воздействия на стреловое оборудование: время действия пиропатронов (t_{Π}); коэффициент

действия пиропатронов (K_{Π}), начальная сила пиропатронов (F_{Π}), сила заряда устройства аварийно-силового воздействия на стреловое оборудование (F_{Π}).

Литература

1. Александров М.П., Колобов Л.Н., Лобов И.Н., Никольская Т.А., Полковников В.С. Грузоподъемные машины: учебник для вузов. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, Высшая школа, 2000. 552 с.
2. Голдобина Л.А., Власов А.В., Орлов П.С. Роль дефектоскопии стальных канатов для обеспечения безопасности эксплуатации грузоподъемных кранов // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2009. № 4 (10). С. 51–53.
3. Тайц В.Г. Безопасная эксплуатация грузоподъемных машин: Учеб. пособие для вузов. М.: Академкнига, 2005. 383 с.
4. Великанов А.В., Курганников И.В., Дьяков Д.Е. Проблемы эксплуатации грузоподъемных механизмов и пути их решения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1. С. 227–233.
5. Позынич Е.К., Позынич К.П., Ковалев И.Б. Определение степени деградации несущих крановых металлоконструкций по параметрам твердости при оценке остаточного ресурса стреловых кранов с жесткой подвеской стрелы // Вестник института тяги и подвижного состава. 2013. № 9. С. 64–67.
6. Вайнсон А.А. Подъемно-транспортные машины: Учебник для вузов по специальности «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование». 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 536 с.
7. Справочник по кранам: В 2 т. Т. 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций / В.И. Браунде, М.М. Гохберг, И.Е. Звягинин и др.; Под общ. ред. М. М. Гохберга. Л.: Машиностроение, 1988. 536 с.
8. Ватулин Я.С., Чуян С.Н., Попов В.А., Орлов С.В. Исследование экстремальных режимов работы транспортных систем средствами Solidworks-Motion // Системы автоматизированного проектирования на транспорте: материалы VII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. С. 28–43.
9. Ватулин Я.С., Потахов Е.А. Нагруженность телескопической стрелы железнодорожного крана при внезапном снятии нагрузки // Транспорт Урала. 2018. № 3 (58). С. 13–20.

10. Зарецкий А.А., Колобасев М.В. Устойчивость свободностоящих башенных кранов при обрыве груза // Подъемно-транспортное дело. 2008. № 5 (49). С. 5–7.
 11. Павлов В.П., Карасев Г.Н. Дорожно-строительные машины. Системное проектирование, моделирование, оптимизация: учеб. пособие. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. 240 с.
 12. Гохберг М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1969. 520 с.
 13. Фам Хонг Куанг. Динамические нагрузки строительных самоходных гидравлических кранов с телескопической стрелой: дис. ... канд. техн. наук. М., 1994. 126 с.
 14. Ватулин Я.С., Потахов Е.А., Потахов Д.А. Способ повышения безопасности и система безопасности стрелового грузоподъемного крана. Патент на изобретение RU 2700312, 16.09.2019. Заявка № 2018129511 от 13.08.2018.
- References**
1. Aleksandrov M.P., Kolobov L.N., Lobov I.N., Nikol'skaya T.A., Polkovnikov V.S. · yye *Gruzo-pod'yemnyye ma-shiny: uchebnik dlya vuzov* [Lifting machines: textbook for universities]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, Vysshaya shkola Publ., 2000. 552 p.
 2. Goldobina L.A., Vlasov A.V., Orlov P.S. The role of flaw detection of steel ropes to ensure the safety of the operation of cranes. *Tekhniko-tehnologicheskiye problemy servisa*. 2009. No 4 (10), pp. 51–53 (in Russ.).
 3. Tayts V.G. *Bezopasnaya ekspluatatsiya gruzo-pod'yemnykh mashin: Ucheb. posobiye dlya vuzov* [Safe operation of hoisting machines: Textbook for universities]. Moscow: Akademkniga Publ., 2005. 383 p.
 4. Velikanov A.V., Kurgannikov I.V., D'yakov D.E. Problems of operation of hoisting mechanisms and its solutions. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014. No 1, pp. 227–233 (in Russ.).
 5. Pozynich Ye.K., Pozynich K.P., Kovalev I.B. Determining the degree of degradation of load-bearing crane metal structures by hardness parameters when assessing the residual life of jib cranes with a rigid boom suspension. *Vestnik instituta tyagi i podvizhnogo sostava*. 2013. No 9, pp. 64–67 (in Russ.).
 6. Vaynson A.A. *Pod'yemno-transportnyye mashiny: Uchebnik dlya vuzov po spetsial'nosti «Pod'yemno-transportnyye, stroitel'nyye, dorozhnyye mashiny i oborudovaniye»*. 4-e izd., pererab. i dop. [Hoisting and transport machinery: A textbook for universities on the program “Hoisting and transport, construction, road vehicles and equipment”]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1989. 536 p.
 7. *Spravochnik po kranam* [Crane Reference]: V 2 t. T. 1. *Kharakteristiki materialov i nagruzok. Osnovy rascheta kranov, ikh privodov i metallicheskikh konstruktсий* [Characteristics of materials and loads. Basics of calculating cranes, their drives and metal structures]. V.I. Braunde, M.M. Gokhberg, I.E. Zvyanyagin i dr.; Pod obshch. red. M.M. Gokhberga. Leningrad: Mashinostroyeniye Publ., 1988. 536 p.
 8. Vatulin Ya.S., Chuyan S.N., Popov V.A., Orlov S.V. The study of extreme operating modes of transport systems using SolidworksMotion. *Sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya na transporte: materialy VII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Computer-aided design systems in transport: materials of the VII international scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists]. SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2017, pp. 28–43 (in Russ.).
 9. Vatulin Ya.S., Potakhov Ye.A. Loading of the telescopic boom of a railway crane during sudden release of load. *Transport Urala*. 2018. No 3 (58), pp. 13–20 (in Russ.).
 10. Zaretskiy A.A., Kolobayev M.V. Stability of self-supporting tower cranes at a break of freight. *Pod'yemno-transportnoye delo*. 2008. No 5 (49), pp. 5–7 (in Russ.).
 11. Pavlov V.P., Karasev G.N. *Dorozhno-stroitel'nyye mashiny. Sistemnoye proyektirovaniye, modelirovaniye, optimizatsiya: ucheb. posobiye* [Road-building machinery. System design, modeling, optimization: textbook]. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t Publ., 2011. 240 p.
 12. Gokhberg M.M. *Metallicheskiye konstruktсий pod'yemno-transportnykh mashin. 2-e izd., pererab. i dop.* [Metal structures of hoisting machines]. Leningrad: Mashinostroyeniye Publ., 1969. 520 p.
 13. Fam Khong Kuang. *Dinamicheskiye nagruzki stroitel'nykh samokhodnykh gidravlicheskikh kranov s teleskopicheskoy streloy: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Dynamic loads of telescopic boom hydraulic construction cranes: Dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]. Moscow, 1994. 126 p.
 14. Vatulin Ya.S., Potakhov Ye.A., Potakhov D.A. *Sposob povysheniya bezopasnosti i sistema bezopasnosti strelovogo gruzopod'yemnogo krana* [A way to improve security and safety system of a jib crane]. Patent na izobreteniyе RU 2700312, 16.09.2019. Zayavka No 2018129511 ot 13.08.2018.

INTERACTION OF ELEMENTS OF THE TELESCOPIC BOOM AS A RESULT OF SUDDEN LOAD REMOVAL

E.A. Potakhov, PhD in Engineering **YA.S. Vatulin**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia

epotakhov@mail.ru

Nowadays, self-propelled jib cranes equipped with telescopic jib equipment are widely used in construction, loading, unloading and installation works. Accidents of self-propelled jib cranes caused by a sudden break of a cargo rope, as well as spontaneous unloading of cargo, can be attributed to the main causes of accidents of hoisting cranes. This reason can be considered as one of the most dangerous, since sudden release of the load is characterized by unpredictability, independence from the skill of the operator and the transience of the impact. The aim of the work is to study the loading of telescopic boom equipment during sudden load removal and to propose measures to prevent or reduce the consequences of accidents caused by this type of loading. The railway crane "Sokol 80.01M" was selected as the object of study. The method of numerical experiment, carried out in the module of complex dynamic and kinematic analysis of SolidWorks Motion mechanisms was used as a research method. As a result of numerical simulation of instantaneous load removal, balancing of the telescopic boom on the sliding plates and shock interactions of the boom sections were established. The following parameters were determined: the time dependence of the sliding support reactions, the magnitude of shock interactions, and the time dependence of the boom head vibrations. It is proposed to use on a self-propelled jib cranes the "Method to increase the safety and security system of a jib crane", which, in addition to protecting the crane from overload and from collisions of its boom or load-lifting body with various obstacles (coordinate protection), due to the presence of pyro-cartridges and their control subsystem, ensure the prevention of accidents in the event of a sudden removal of the load from the boom, as well as the protection of the hoisting machine when exposed to random external factors, damage reduction with irreversible loss of stability of the crane. The most rational parameters of the emergency power device for boom equipment were established: the time of action of the squib; the action coefficient of the squibs, the initial force of the squibs, the charge force of the emergency power device on the boom equipment.

Keywords: telescopic boom, Sokol 80.01M, squib, sudden load removal.