

УДК (UDC) 621.873.2/.3

НАГРУЖЕННОСТЬ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ СТРЕЛЫ В ПРОЦЕССЕ ПОВОРОТА

LOADING OF THE TELESCOPIC BOOM DURING A TURN

Потахов Е.А.

Potakhov E.A.

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university (St. Petersburg, Russia)

Аннотация. Статья посвящена исследованию нагружения телескопической стрелы стрелового грузоподъемного крана. В качестве методов исследования используется метод численного эксперимента, проведенного в модуле комплексного динамического и кинематического анализа механизмов SolidWorks Motion, и метод конечных элементов, применяемый в модуле Solid Edge Simulation, основанном на технологии анализа FEA Femap и решателе NX Nastran. Были рассмотрены следующие режимы нагружения телескопического стрелового оборудования: подъем груза, нормированный поворот, внезапная просадка выносной опоры. В результате исследований разработана математическая модель стрелы, которая идентична по своим характеристикам реальному прототипу; установлены зависимости амплитуд кинематических параметров движения рамы и груза крана от величины прокладки аутригера в процессе поворота крана; получен характер нагруженности элементов телескопической стрелы для каждого режима нагружения. Определено напряженно-деформированное состояние телескопической стрелы с учетом взаимодействия секций с боковыми упорами; установлена зависимость наибольших напряжений конструкции от величины прокладки выносной опоры; определена значимость влияния вертикальных и горизонтальных внешних и местных нагрузок на нагруженность телескопического стрелового оборудования.

Ключевые слова: телескопическая стрела, просадка, местные нагрузки, Solid Edge Simulation

Дата принятия к публикации: 10.10.2019
Дата публикации: 25.12.2019

Сведения об авторе:

Потахов Егор Александрович – аспирант, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), e-mail: epotakhov@mail.ru

ORCID: 0000-0003-4206-9148

Abstract. The article is devoted to the study of the loading of a telescopic boom of a jib crane. The research methods used are the numerical experiment method, carried out in the module of complex dynamic and kinematic analysis of SolidWorks Motion mechanisms, and the Finite Element Method, used in the Solid Edge Simulation module, based on the FEA Femap analysis technology and NX Nastran solver. The following loading modes of telescopic boom equipment were considered: load lifting, normalized rotation, sudden drawdown of the outrigger. As a result of research, a numerical model of a jib crane equipped with a telescopic boom is developed, which is identical in its characteristics to a real prototype; the dependences of the amplitudes of the kinematic parameters of the frame motion and the crane load on the outrigger drawdown during the rotation of the crane are established; The character of loading of elements of the telescopic boom for each loading mode is obtained. The stress-strain state of the telescopic boom is determined taking into account the interaction of the sections with the side stops; the dependence of the highest structural stresses on the magnitude of the drawdown of the outrigger is established; The significance of the influence of vertical and horizontal external and local loads on the loading of telescopic boom equipment is determined.

Keywords: telescopic boom, drawdown, local loads, Solid Edge Simulation.

Date of acceptance for publication: 10.10.2019
Date of publication: 25.12.2019

Author's information:

Egor A. Potakhov - graduate student, Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university (PGUPS), e-mail: epotakhov@mail.ru

ORCID: 0000-0003-4206-9148

1. Введение

В настоящее время при производстве строительных, погрузо-разгрузочных и монтажных работ из всех типов грузоподъемных кранов наибольшее применение находят самоходные стреловые краны, оснащенные телескопическим стреловым оборудованием [1]. Телескопическая стрела представляет собой консольную стержневую конструкцию ступенчатой жесткости, состоящую из сопрягаемых одной неподвижной (корневой) и нескольких подвижных секций, каждая последующая из которых входит вовнутрь предыдущей. Подвижные секции опираются на опорные элементы, передние из которых расположены в нижней передней части внешней секции, а задние – в верхней задней части внутренней секции. От бокового смещения секции удерживаются боковыми упорами. Перемещение секций может осуществляться системой канатов, длинноходовыми гидроцилиндрами двойного действия или комбинированными канатно-гидравлическими механизмами.

Широкое распространение данного грузоподъемного средства обусловлено его экономической эффективностью, которая определяется универсальностью функционально-технологических свойств в сочетании с мобильностью и высокой энерговооруженностью гидрофицированного оборудования.

В то же время, грузоподъемные краны являются объектами повышенной производственной опасности и их эксплуатация связана с вероятностью образования аварийных ситуаций с негативными технико-экономическими и социальными последствиями [2]. Из всего спектра неблагоприятных факторов, оказывающих влияние на надежность грузоподъемного крана в целом и на телескопическую стрелу в частности, наиболее опасными являются возмущения, природа которых носит случайный характер и не зависит от квалификации оператора. К таким воздействиям можно отнести инерционные нагрузки, обусловленные внезапной просадкой аутригера. Особенно данное явление опасно в процессе азимутального перемещения груза. Помимо

непредсказуемости появления этот вид нагружения характеризуется быстротечностью воздействия и действием на телескопическое стреловое оборудование одновременно трёх инерционных сил (центробежной, касательной, вертикальной). Изучению воздействия просадки выносных опор на стреловой кран был посвящен ряд работ [3-8], но в большинстве исследований рассматривалось влияние данного режима на устойчивость крана и нагруженность опорного контура. Нагруженности телескопической стрелы в результате просадки аутригера было уделено недостаточное внимание.

Задачей исследования является изучение нагруженности телескопической стрелы в результате просадки выносной опоры грузоподъемного крана в процессе поворота. В качестве объекта исследования выбран железнодорожный кран «Сокол 80.01М».

2. Создание численной модели крана

Натурные исследования стреловых кранов, связанные с доведением грузоподъемной машины до предельного состояния, представляют значительные сложности, поскольку предполагают большие материальные затраты, снижение ресурса оборудования и повышенную производственную опасность.

В связи с этим, для исследования нагруженности телескопической стрелы в результате просадки выносной опоры грузоподъемного крана в процессе поворота целесообразно применить методику численного эксперимента, с помощью которого можно получить необходимые данные, исключив вышеуказанные недостатки натурального исследования.

Компьютерное моделирование осуществлялось в среде специализированного функционала Motion (комплексный динамический и кинематический модуль) программного комплекса SolidWorks и модуле проведения расчетов методом конечных элементов Solid Edge Simulation, основанном на технологии анализа FEA Femap и решателе NX Nastran.

Технология численного моделирования включает два этапа. На первом этапе создается виртуальная модель объекта, идентич-

ная по своим наиболее существенным характеристикам объекта исследования. На втором проводится численный эксперимент с целью изучения объекта и его элементов в условиях определенного нагружения.

Создание модели «Сокол 80.01М», соответствующей реальному прототипу, было описано в работе [9]. В связи с тем, что в данной численной модели не учитывается просадка грунта под выносной опорой и колебательный характер движения груза, модель дополняется механизмом просадки грунта, разработанным в работе [5] и механизмом подъема груза.

Схема моделирования механизма подъема груза динамической модели крана представлена на рис. 1. Согласно нормативно-технической документации [10, 11] из всех видов ветвевых канатных стропов только грузоподъемность четырехветвевого грузового канатного стропа (4СК) дает возможность перемещать груз весом 25 тонн. В связи с этим данный тип стропов, который имитируется элементом «пружина» (с3, с4, с5, с6), применяется в качестве грузозахватного приспособления модели.

Гибкий тяговый орган (канат) моделируется системой, состоящей из фиктивных

шарниров (ФШ1, ФШ2) и четырех абсолютно упругих протяженных цилиндрических осей, соединенных с фиктивными шарнирами пружинами (с7, с8) и демпферами (д3, д4), места расположения которых определяются посредством модально-частотного анализа. Фиктивные шарниры воспроизводят поперечную жесткость каната, продольные вязкоупругие элементы – продольную. Характеристики пружин (коэффициент упругости, показатель степени выражения силы пружины) и демпферов (показатель степени выражения силы демпфера, коэффициент демпфирования) подбираются в соответствии с требованиями нормативных документов на канаты.

Действующие на груз при вращении поворотной платформы силы сопротивления (упругости) воздушной среды моделируются показанными на рис. 1 вязкоупругими элементами системы «груз-вспомогательные стойки» (с1, с2, д1, д2). В связи с тем, что масса вспомогательных стоек крайне незначительна, и они неподвижно прикреплены к оголовку, стойки не оказывают ощутимого влияния на телескопическую стрелу в процессе поворота крана.

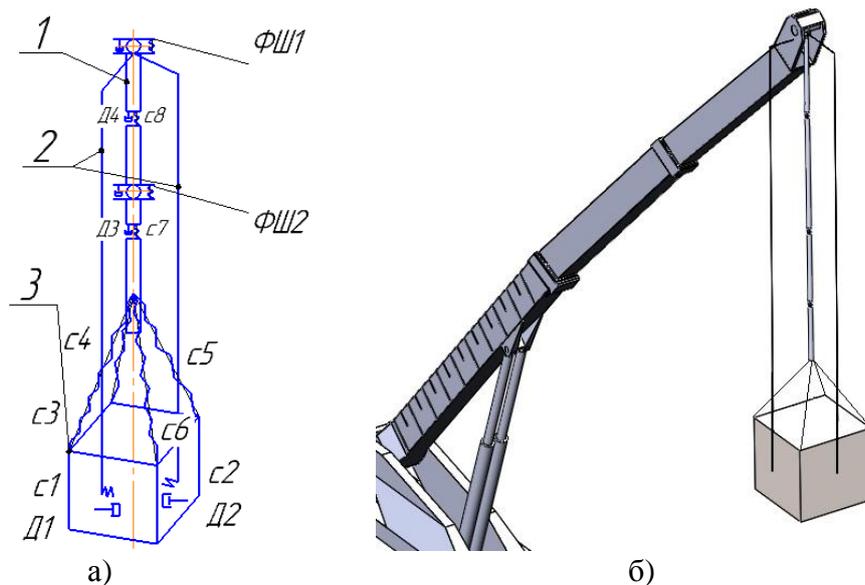


Рис. 1. Механизм подъема груза: а – схема; б – реализация в функционале Motion (1 – канат; 2 – вспомогательные стойки; 3 – груз; ФШ1, ФШ2 – фиктивные шарниры 2-го рода; с1, с2, д1, д2 – вязкоупругие элементы системы «груз-вспомогательные стойки»; с3, с4, с5, с6 – упругие элементы системы «груз-канат»; с7, с8, д3, д4 – вязкоупругие продольные элементы)

3. Численное моделирование вращения крана с просадкой аутригера

Виртуальный эксперимент выполнялся при опорном контуре крана с максимально выдвинутыми аутригерами, максимальной длине телескопической стрелы (25 м), максимальном угле подъема ($49^{\circ}20'$) и соответствующими этим показателям вылете в 13 м и грузоподъемности в 25 т.

Численное моделирование поворота железнодорожного крана «Сокол 80.01М» с внезапной просадкой одной из опор осуществлялось следующим образом: модель грузоподъемного крана установлена на грунтовой площадке; к поворотной платформе прикладывается крутящий момент, в результате чего происходит поворот стрелового оборудования крана. Момент начала поворота характеризуется небольшим скачком ускорения и скорости груза, а также небольшим горизонтальным отклонением, которые обусловлены инерционной нагрузкой.

При эксплуатации кранов из-за неравномерного внедрения аутригеров в грунт чаще всего имеет место трехопорная схема опирания грузоподъемной машины [5-8], трансформирующаяся в зависимости от положе-

ния стрелового оборудования [5]. Это особенно ярко выражается при значительной просадке одной из опор. В момент перемещения груза над опорой №1 (рис. 2, II положение телескопической стрелы) посредством механизма реализации просадки опор осуществляется просадка аутригера, составляющая 15 мм. В результате происходит резкое перемещение груза в вертикальной и в горизонтальной плоскостях. Заброс груза сопровождается резким увеличением ускорения и скорости груза (рис. 3).

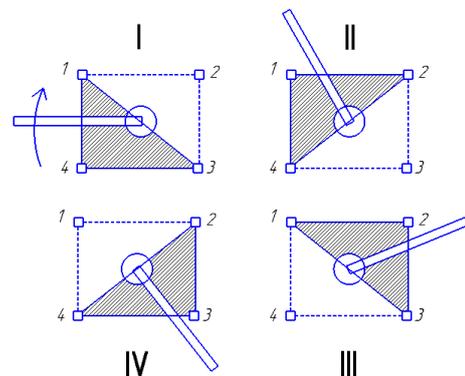


Рис. 2. Схема трансформации ядра опирания крановой установки:
1, 2, 3, 4 – опоры крана; I, II, III, IV – положения стрелы при повороте

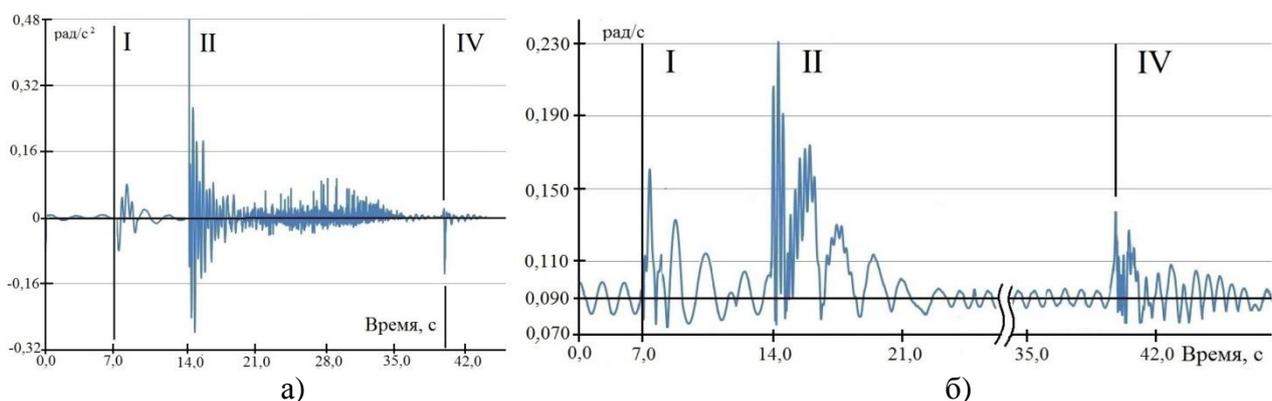


Рис. 3. Временная зависимость ускорения и скорости груза при повороте:

а – угловое ускорение; б – угловая скорость

(Расчетные положения: 0 – до поворота; I – момент начала поворота; II – момент просадки выносной опоры; IV – момент поднятия просевшей опоры)

При IV положении стрелы смена опорного контура сопровождается поднятием просевшей опоры №1. В результате происходит повторный, но менее значительный горизонтальный заброс груза и одновременное рез-

кое поднятие его вверх, что также характеризуется увеличением ускорения и скорости груза (рис. 2 и 3).

В связи с тем, что касательная и центробежная силы инерции груза прямо пропор-

циональны соответственно угловому ускорению и угловой скорости груза [8], графики инерционных сил будут аналогичны временным зависимостям, представленным на рис. 4.

Вертикальное перемещение груза в результате просадки опоры вызывает резкое возрастание и колебательный характер изменения реакций опорных элементов телескопической стрелы (рис. 4). Горизонтальные силы заброса обуславливают чередование

схем нагружения телескопической стрелы: в момент просадки наблюдается переход от первоначального горизонтального расчетного положения во второе; далее под действием касательной силы инерции груза происходит возвращение в первое расчетное положение; переходы расчетного положения сопровождаются скачкообразным увеличением значений реакций боковых упоров (рис. 5).

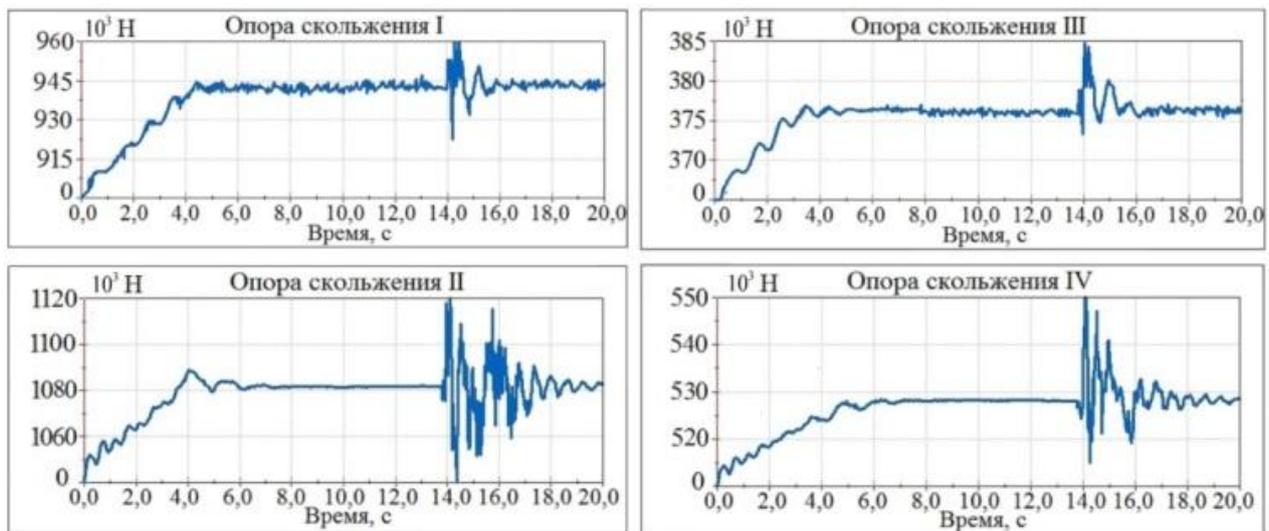


Рис. 4. Временная зависимость реакций опор скольжения

Известно, что наибольшие напряжения телескопической стрелы возникают в сечениях давления опорных элементов [12-14], где происходит суммирование деформаций от внешних нагрузок и сил, действующих со стороны опорных элементов (местных нагрузок), а также проявляется стеснение деформацией. Максимальная нагруженность образуется в поясе, в местах под опорными элементами и в зонах, которые расположены в сечении опорных элементов, в непосредственной близости к грани соединения стенки и полки [12]. При этом в существующих исследованиях [12-18], посвященных изучению данной темы, рассматривается напряженно-деформированное состояние стоек и поясов телескопической стрелы, обусловленное действием только вертикальных нагрузок без влияния боковых упоров.

С целью определения влияния внешних и местных вертикальных и горизонтальных нагрузок на нагруженность секций в среде

Solid Edge Simulation проводился прочностной анализ конструкции с тремя расчетными случаями:

- 0) до поворота;
- I) начало поворота;
- II) в момент просадки выносной опоры.

Так как между упорами и боковыми поверхностями секций для исключения заклинивания оставляется небольшой зазор (величиной до 1 мм), то при нагружении стенки телескопической стрелы свободно деформируются на расстоянии межсекционного зазора, а затем взаимодействуют с боковыми упорами. Данное взаимодействие невозможно учесть, используя одну секцию и применяя к ней ограничения (опоры) модуля расчета конечными элементами типа «заделка», «ползун» и «шарнир». В связи с этим, численная расчетная модель составляется из сопряженных двух секций: корневой и средней, одна из которых испытывает внешние воздействия, а другая ограничивает дефор-

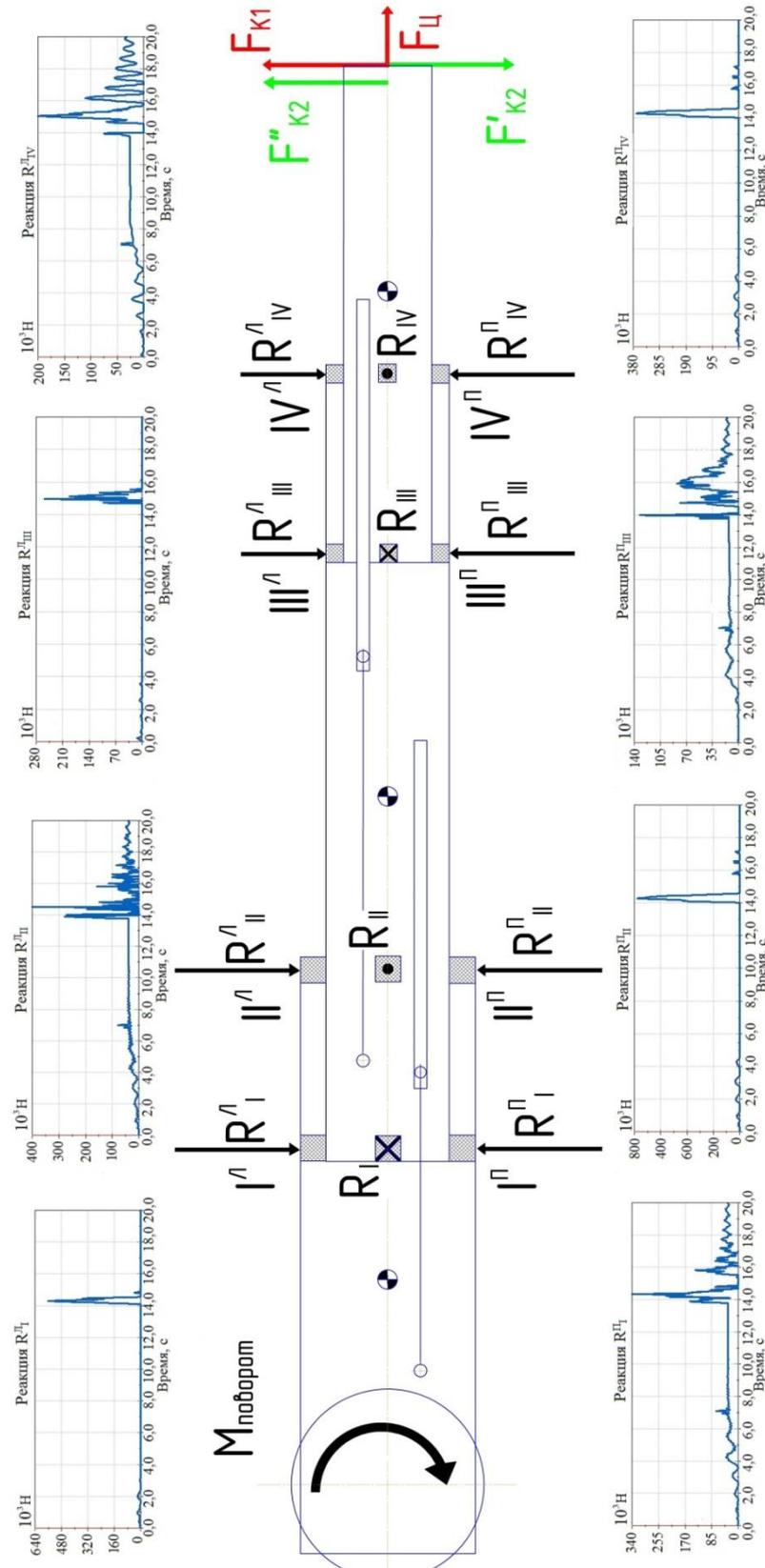


Рис. 5. Схема нагружения секций телескопической стрелы

$R^I \dots R^{IV}$ – левые боковые упоры; $R^I \dots R^{IV}$ – правые боковые упоры; $R_I \dots R_{IV}$ – реакции опор скольжения; $R^I_1 \dots R^I_{IV}$ – реакции левых боковых упоров; $R^I_1 \dots R^I_{IV}$ – реакции правых боковых упоров; $M_{\text{поворот}}$ – момент поворота; $F_{\text{ц}}$ – центробежная сила инерции; F_{K1} – касательная сила инерции при повороте; $F'_{\text{K2}}, F''_{\text{K1}}$ – касательные силы инерции при просадке опоры

мирование нагруженной секции. При определении напряженно-деформированного состояния средней секции средняя секция испытывает нагружение, а корневая секция служит ограничением; при исследовании нагруженности корневой секции – наоборот.

При азимутальном перемещении груза в связи с гибкостью тягового органа груз отклоняется от оси подвеса. Наиболее опасным случаем является одновременный выход груза из продольной и поперечной плоскости стрелы, что можно наблюдать при просадке аутригера (рис. 3). При отклонении груза от оси подвеса на некоторое расстояние (a , b) во всех плоскостях телескопической стрелы приложим к оголовку две равные по величине и противоположно направленные силы (сила тяжести груза, касательная сила инерции). Каждая две силы из трёх образуют пару сил с крутящим моментом. Таким образом, телескопическая стрела испытывает совместное действие изгиба и кручения в горизонтальной, фронтальной и профильной плоскостях. Всего на стрелу одновременно воздействуют две изгибающие силы и три крутящих момента (рис. 6).

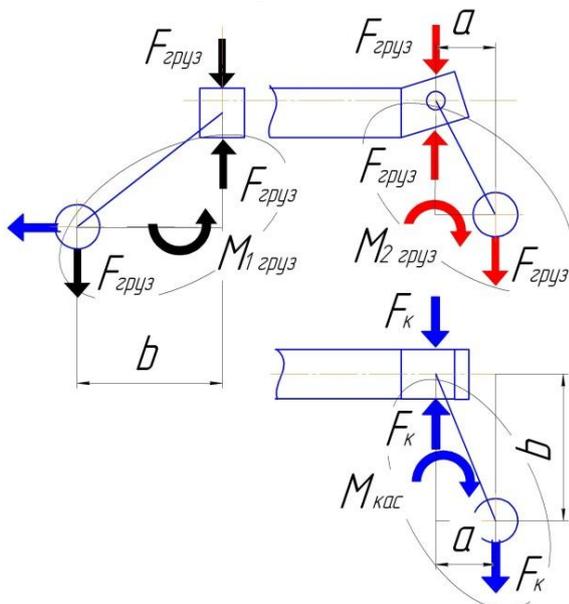


Рис. 6. Схема действия внешних сил, обусловленных грузом, на стреловое оборудование

В результате расчета методом конечных элементов получены эпюры нагруженности

трех секций от действия местных и внешних сил (табл. 1).

На основании результатов прочностного расчета телескопической стрелы методом конечных элементов можно сделать следующие выводы:

1. Местные напряжения в сечении II, соответствующему наибольшей нагруженности телескопической стрелы, превышают напряжения, вызванные внешними нагрузками в 2,23 раза при 0-м, I-м и II-м расчетных случаях. Это не противоречит результатам исследований [12, 17, 18], согласно которым напряжения, вызванные местными усилиями, могут в несколько раз превышать напряжения от внешних нагрузок.

2. При нормированном повороте напряжения секций, обусловленные местными и внешними нагрузками, возрастают на 0,5% и 1,0% соответственно.

3. В момент просадки опоры крана напряжения конструкции, обусловленные местными и внешними нагрузками, увеличиваются примерно на 20% относительно нагруженности «нулевого» положения.

4. Соотношение максимальных напряжений, обусловленных вертикальными и горизонтальными внешними и местными силами, в соответствии с расчетными положениями представлено в табл. 2.

5. Максимальная нагруженность телескопической стрелы, вызванная действием горизонтальных сил, образуется в сечениях давления боковых упоров. Здесь происходит суммирование деформаций от внешних и местных горизонтальных нагрузок: в стенке под боковыми упорами и в зонах, расположенных в непосредственной близости к грани соединения стенки и полки.

6. При «нулевом» расчетном случае наибольшие местные напряжения в конструкции возникают в полке, в местах под опорными элементами и в зонах, расположенных в сечении опорных элементов, в непосредственной близости к ребру соединения стойки и пояса, что не противоречит результатам исследований [12].

Таблица 1

Нагружение корневой секции телескопической стрелы от местных и внешних нагрузок

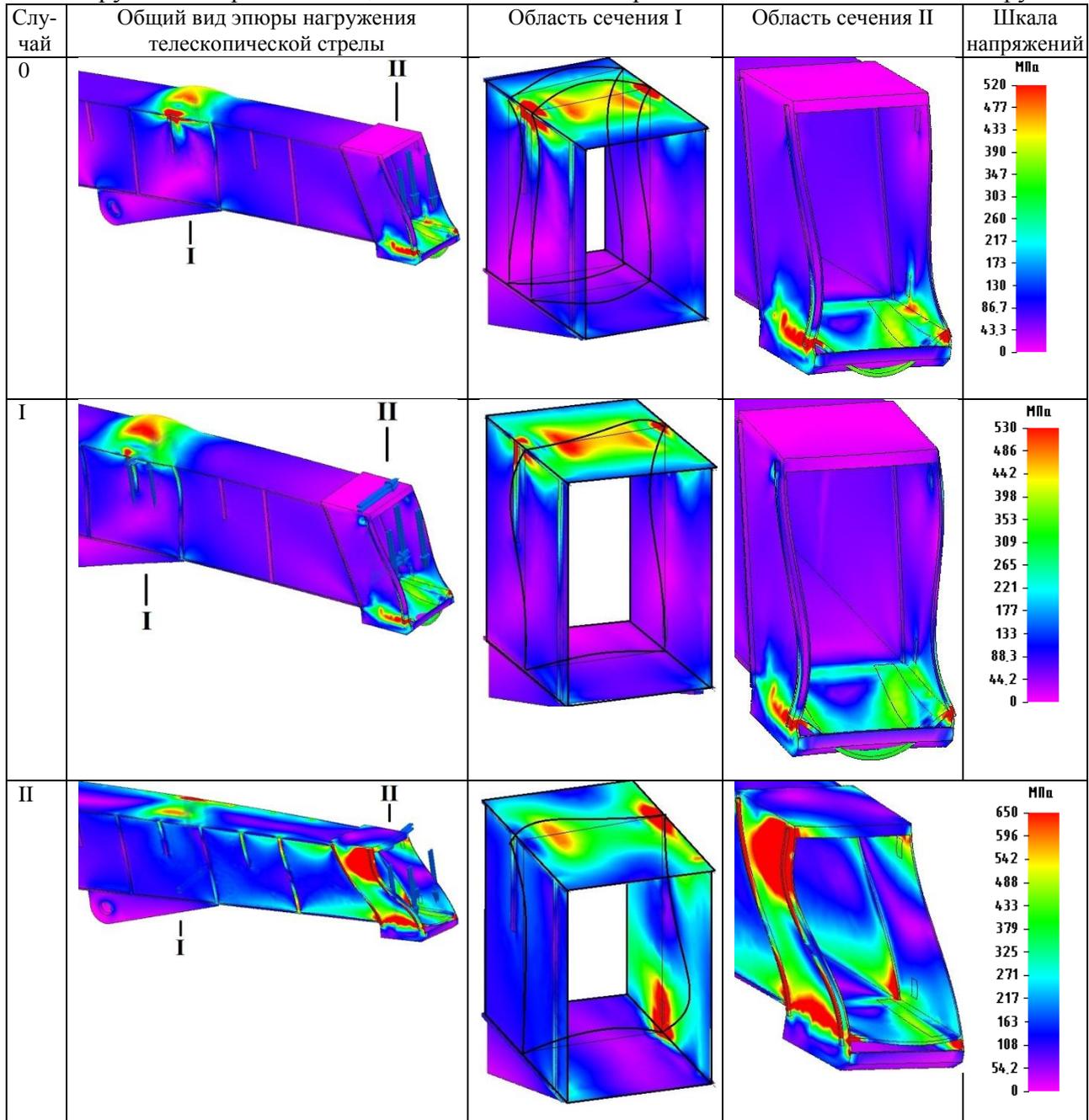


Таблица 2

Соотношение максимальных напряжений телескопической стрелы, вызванных внешними и местными нагрузками

Расчетный случай	Напряжения, обусловленные местными усилиями, МПа		
	вертикальные усилия	горизонтальные усилия	суммарные усилия
0 (до поворота)	446	0	446
I (нормированный поворот)	446	37	448
II (момент просадки аутригера)	453	323	556

Окончание табл. 2

	Напряжения, обусловленные внешними усилиями, МПа		
	вертикальные усилия	горизонтальные усилия	суммарные усилия
0 (до поворота)	200	0	200
I (нормированный поворот)	200	17	202
II (момент просадки аутригера)	204	145	250

При повороте в связи с малыми по величине горизонтальными нагрузками максимальная напряженность секций практически идентична нагруженности «нулевого» положения. Заметное исключение составляет распределение напряжений в I-м сечении корневой области: наблюдается увеличение максимально нагруженной области под опорным элементом, ближе расположенного к первому правому боковому упору, подверженному действию горизонтальной нагрузки; и соответствующее уменьшение максимально нагруженной области под опорным элементом, расположенным дальше от первого правого бокового упора.

В момент просадки аутригера в связи со значительными горизонтальными нагрузками происходит заметное перераспределение и увеличение напряжений секций. Наибольшая нагруженность образуется в областях действия местных боковых нагрузок, а также в области действия реакции того опорного элемента, который ближе расположен к району действия боковых нагрузок, и в зонах, расположенных между действиями местных вертикальных и горизонтальных нагрузок, в непосредственной близости к грани соединения стенки и полки.

7. Исходя результатов прочностного расчета, можно заключить, что максимальные деформации (вогнутости и выпуклости) полка и стенок телескопической стрелы в основном образуются в сечениях расположения опорных элементов и боковых упоров и вызваны местными нагрузками. Это не противоречит существующим исследованиям, где утверждается, что наибольшие прогибы поясов и стоек секций образуются в сечении опорных элементов [12-14].

Исключение составляют деформации стоек при «нулевом» расчетном случае в области сечения II средней и в области сечения I корневой секции, где наибольшие прогибы

наблюдаются на некотором расстоянии от плоскости расположения опорных элементов и боковых упоров. Это вызвано отсутствием действия горизонтальных нагрузок и препятствием боковыми упорами большой деформации стенок.

Характерно, что при «нулевом» режиме нагружения в I сечении корневой секции и II сечении средней секции верхняя часть стенки имеет выпуклость во внутрь сечения, а нижняя – в противоположную сторону, что не противоречит результатам работы [12].

При аппроксимации данных, полученных в результате проведения серии компьютерных экспериментов поворота крановой платформы с внезапной просадкой аутригера для ряда величин просадки опоры, были получены зависимости амплитудных значений параметров нагружения крана от величины просадки (рис. 7 - 9).

Исходя из результатов серии численных экспериментов, можно сделать следующие выводы относительно зависимости нагружения телескопической стрелы от увеличения значения просадки:

1. Наблюдается медленный рост напряжений, обусловленных вертикальными нагрузками, и резкое возрастание напряжений, вызванных горизонтальными силами.

2. До просадки в 30 мм наибольшая нагруженность обусловлена вертикальными нагрузками, после – наибольшая нагруженность вызвана горизонтальными силами.

3. При любом значении просадки аутригера напряжения, обусловленные местными нагрузками, превышают напряжения, вызванные внешними силами.

4. Излом телескопической стрелы предположительно произойдет при просадке в 30 мм, так как при этом максимальные напряжения конструкции достигают предела текучести (690 МПа для марки стали стрелы крана «Сокол 80.01М» – 14ХГН2МДАФБ).

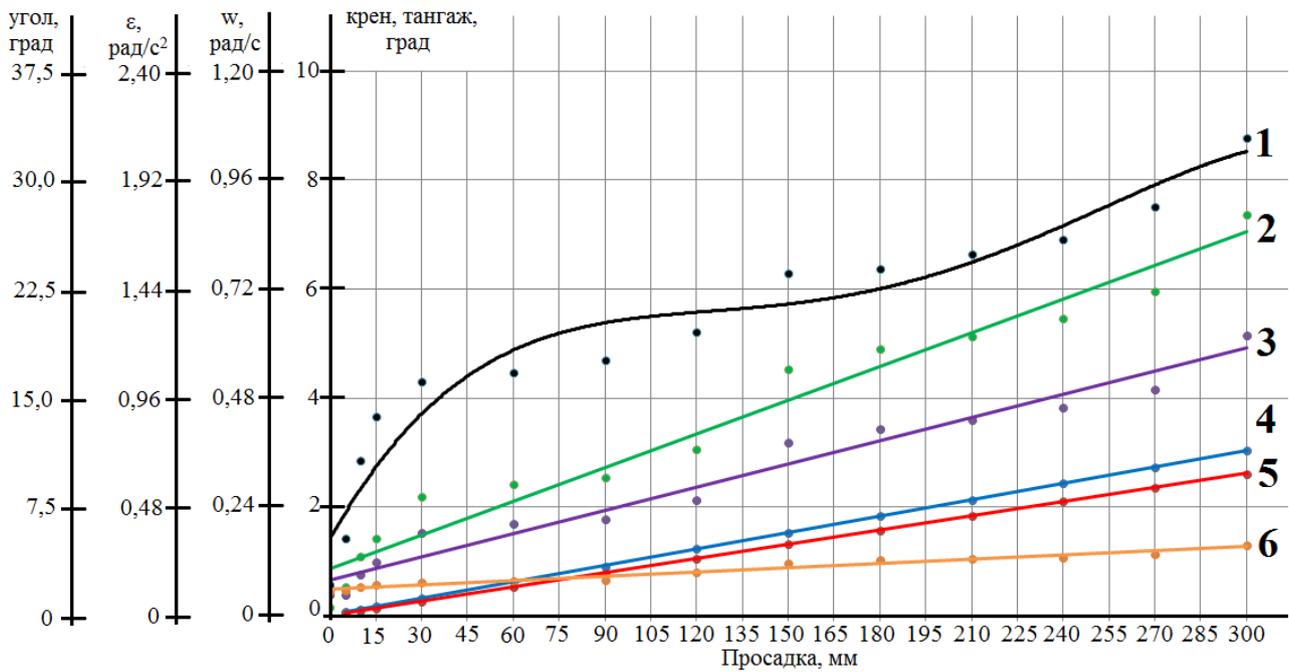


Рис. 7. Зависимость амплитуд кинематических параметров движения рамы и груза крана от величины просадки аутригера:
 1 – угол груза из плоскости, 2 – угловая скорость груза, 3 – угловое ускорение груза,
 4 – крен рамы, 5 – тангаж рамы, 6 – угол груза в плоскости

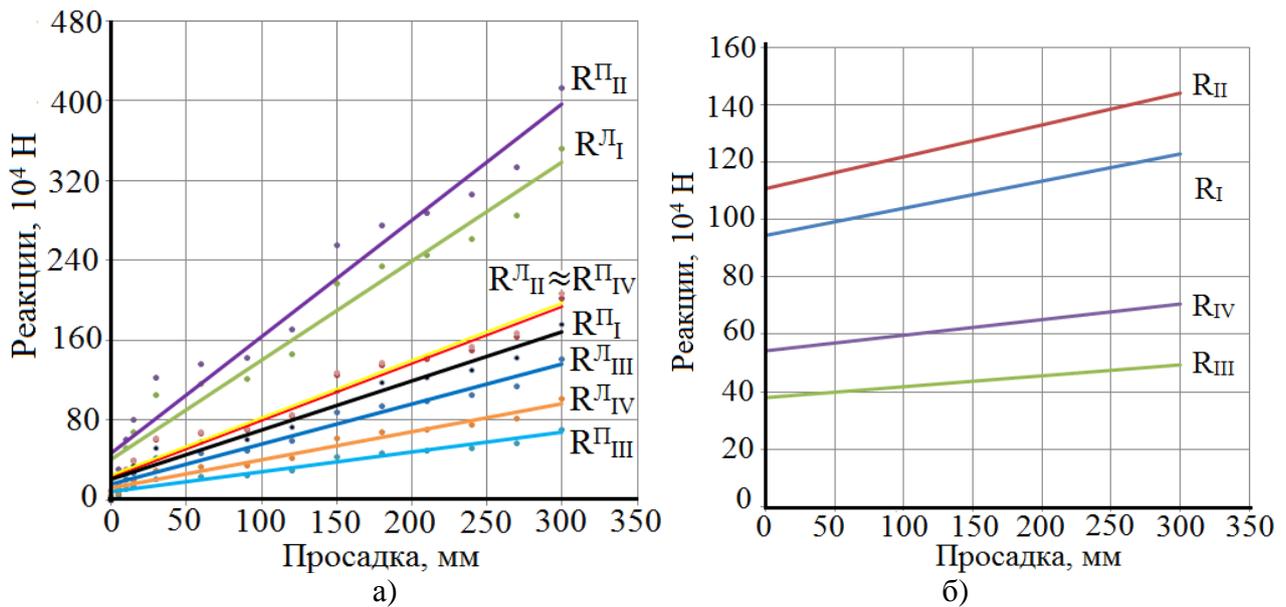


Рис. 8. Зависимость амплитуд реакций элементов телескопической стрелы от величины просадки аутригера: а – боковые упоры стрелы, б – опорные элементы стрелы

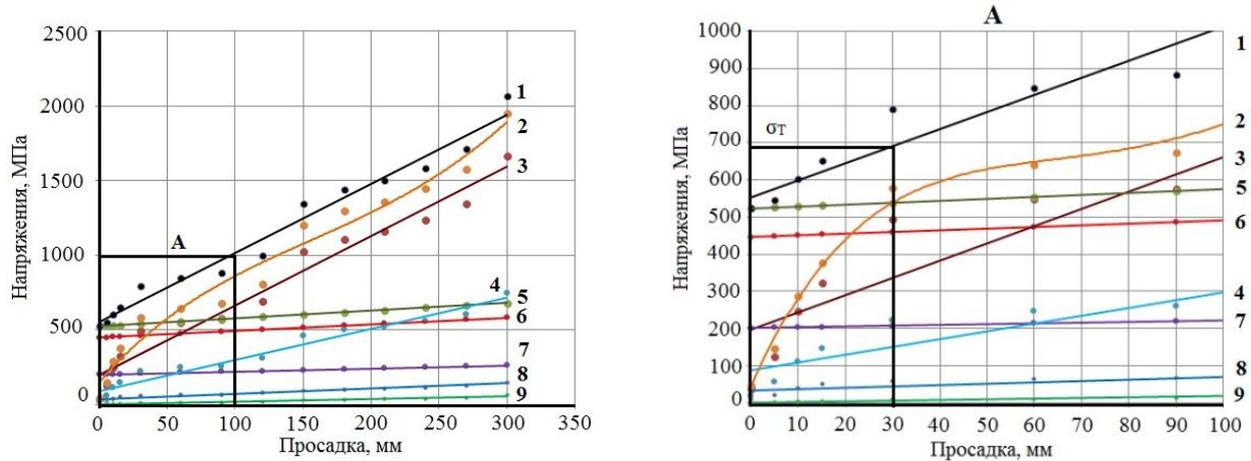


Рис. 9. Зависимость максимальных напряжений телескопической стрелы от величины просадки аутригера, вызванные:

- 1 – суммарными горизонтальными и вертикальными нагрузками,
- 2 – суммарными горизонтальными нагрузками,
- 3 – горизонтальными местными нагрузками,
- 4 – горизонтальными внешними нагрузками,
- 5 – суммарными вертикальными нагрузками,
- 6 – вертикальными местными нагрузками,
- 7 – вертикальными внешними нагрузками,
- 8 – вертикальными внешними крутящими нагрузками,
- 9 – горизонтальными внешними крутящими нагрузками

Кран выйдет из устойчивого состояния предположительно при просадке немногим больше 300 мм, так как согласно паспорта крана допустимый уклон площадки для установки при работе составляет 3 град. В связи с этим можно заключить, что потеря местной устойчивости телескопической стрелы произойдет раньше потери общей устойчивости крана.

4. Заключение

В процессе исследований была создана математическая модель стрелового самоходного крана, оборудованного телескопической стрелой, идентичная по своим характеристикам реальному прототипу.

В результате численного моделирования внезапной просадки аутригера в процессе поворота стрелового крана получены зави-

симости амплитуд кинематических параметров движения рамы и груза крана от величины просадки. Установлен характер нагружения элементов телескопической стрелы при подъеме груза, при нормированном повороте, внезапной просадки выносной опоры.

В результате расчета методом конечных элементов:

- получено напряженно-деформированное состояние телескопического стрелового оборудования с учетом взаимодействия секций с боковыми упорами;

- установлена зависимость максимальных напряжений стрелы от величины просадки аутригера;

- определена значимость влияния на нагруженность телескопических секций вертикальных и горизонтальных внешних и местных нагрузок.

Список литературы

1. Александров М.П., Колобов Л.Н., Лобов И.Н., Никольская Т.А., Полковников В.С. Грузоподъемные машины. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, Высшая школа, 2000. 552 с.
2. Тайц В.Г. Безопасная эксплуатация грузоподъемных машин. М.: Академкнига, 2005. 383 с.
3. Trąbka A. The impact of the support system's kinematic structure on selected kinematic and dynamic quantities of an experimental crane // *Acta mechanica et automatica*. 2014. Vol. 8. №4. P. 189–193.
4. Daichi D. Fujioka, Rauch A., Singhose W.E., Taft J. Tip-Over Stability Analysis of Mobile Boom Cranes with Double-Pendulum Payloads // 2009 American Control Conference. St. Louis, MO, USA, June 10-12, 2009, pp. 3136–3141.
5. Чуян С.Н., Ватулин Я.С., Потахов Д.А., Потахов Е.А. Обеспечение безопасного выполнения путевых работ с использованием железнодорожного крана ЕДК 500/1 // *Инновационный транспорт*. 2017. № 1 (23). С. 48-54.
6. Обыденнов В.А., Анцев В.Ю., Сорокин П.А., Мишин А.В. Исследование устойчивости мобильных грузоподъемных машин методом конечных элементов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2011. № 3. С. 30–36.
7. Потахов Д.А. Взаимодействие железнодорожного крана с опорной поверхностью участка железнодорожного пути // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2019. № 1 (56). С. 43–50.
8. Вайнсон А.А. Подъемно-транспортные машины. М.: Машиностроение, 1989. 536 с.
9. Ватулин Я.С., Потахов Е.А. Нагруженность телескопической стрелы железнодорожного крана при внезапном снятии нагрузки // *Транспорт Урала*. 2018. №3 (58). С. 13–19.
10. ГОСТ 25573-82. Стропы грузовые канатные для строительства. Технические условия. Введ. 1984-01-01. М.: ИПК Из-

References

1. Aleksandrov M.P. Kolobov L.N., Lobov I.N., Nikolskaya T. A., Polkovnikov V. S. *Gru-zopodemnyye mashiny* [Lifting-transport machines]. Moscow, Izdatelstvo MGTU im. N.E. Bauman, Vysshaya shkola, 2000. 552 p. (In Russian)
2. Tayts V.G. *Bezopasnaya ekspluatatsiya gruzopodemnykh mashin* [Safe operation of lifting machines]. Moscow, Akademkniga, 2005. 383 p. (In Russian)
3. Trąbka A. The impact of the support system's kinematic structure on selected kinematic and dynamic quantities of an experimental crane. *Acta mechanica et automatica*, 2014, Vol.8, No.4, pp. 189–193.
4. Daichi D. Fujioka, Rauch A., Singhose W.E., Taft J. Tip-Over Stability Analysis of Mobile Boom Cranes with Double-Pendulum Payloads. *Proceedings of 2009 American Control Conference*. St. Louis, MO, USA June 10-12, 2009, pp. 3136–3141.
5. Chuyan S.N., Vatulin Ya.S., Potahov D.A., Potahov E.A. Ensuring safe performance of track work using the EDC 500/1 railway crane. *Innovatsionnyy transport*, 2017, No. 1 (23), pp. 48-54. (In Russian)
6. Obydenov V.A., Antsev V.Yu., Sorokin P.A., Mishin A.V. Study of the stability of mobile lifting machines by the method of finite elements. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2011, No. 3, pp. 30–36. (In Russian)
7. Potahov D.A. Interaction of a railway crane with the supporting surface of a railway section. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorojnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2019. No. 1 (56), pp. 43-50. (In Russian)
8. Vaynson A.A. *Podemno-transportnye mashiny* [Lifting-transport machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 536 p. (In Russian)
9. Vatulin Ya.S., Potahov E.A. Load of the telescopic boom of a railway crane during a sudden removal of the load. *Transport Urala*, 2018, No. 3 (58), pp. 13–19. (In Russian)
10. GOST 25573-82. *Stropy gruzovye kanatnye dlya stroitel'stva. Tekhnicheskie usloviya*. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov,

дательство стандартов, 2004. 65 с.

11. РД 10-33-93. Стропы грузовые общего назначения. Требования к устройству и безопасной эксплуатации. Введ. 1994-06-01. М.: НТЦ Промышленная безопасность, 2006. 92 с.

12. Ряхин В.А., Мошкарёв Г.И. Долговечность и устойчивость сварных конструкций строительных и дорожных машин. М.: Машиностроение, 1984. 232 с.

13. Savkovic M., Gasic M., Pavlovic G. Stress analysis in contact zone between the segments of telescopic booms of hydraulic truck cranes // *Thin-Walled Structure*. 2014. Vol. 85. P. 332–340.

14. Cui Z., Jiang W., Cheng L. Analysis and Experimental Verification of the Strength of Telescopic Booms for Construction Machinery // *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*. 2016. P. 33.1–33.10.

15. Pavlovic A., Fragassa C., Minak G. Buckling analysis of telescopic boom: theoretical and numerical verification of sliding pads // *Tehnicki Vjesnik*. 2017. № 24 (3). P. 729–735.

16. Ряхин В.А., Гривезирский Ю.В., Зайцев Л.В., Мошкарёв Г.Н. Нагруженность крановых телескопических стрел // *Строительные и дорожные машины*. 1984. № 6. С. 9–11.

17. Huber W. Tragfähigkeit von Teleskopen // *Förder und Heben*. 1972. №3. P. 125–127.

18. Башкова Н.В. Исследование на моделях местных напряжений в телескопических стрелах кранов // *Строительные и дорожные машины*. 1977. № 9. С. 16–17.

2004. 65 p. (In Russian)

11. RD 10-33-93. *Stropy gruzovye obshchego naznacheniya. Trebovaniya k ustroystvu i bezopasnoy ekspluatatsii*. Moscow, NTC Promyshlennaya bezopasnost, 2006. 92 p. (In Russian)

12. Ryakhin V.A., Moshkarev G.I. *Dolgovечnost i ustoychivost svarnykh konstrukt-siy stroitelnykh i dorozhnykh mashin* [Durability and stability of welded structures of construction and road machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1984. 232 p. (In Russian)

13. Savkovic M., Gasic M., Pavlovic G. Stress analysis in contact zone between the segments of telescopic booms of hydraulic truck cranes. *Thin-Walled Structure*, 2014, Vol. 85, pp. 332–340.

14. Cui Z., Jiang W., Cheng L. Analysis and Experimental Verification of the Strength of Telescopic Booms for Construction Machinery. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, 2016, pp. 33.1–33.10.

15. Pavlovic A., Fragassa C., Minak G. Buckling analysis of telescopic boom: theoretical and numerical verification of sliding pads. *Tehnicki Vjesnik*, 2017, No. 24 (3), pp. 729–735.

16. Ryakhin V.A., Grivezirskij Yu.V., Zaytsev L.V., Moshkarev G.N. Loading crane telescopic boom. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny*, 1984, No. 6, pp. 9–11. (In Russian)

17. Huber W. Tragfähigkeit von Teleskopen. *Förder und Heben*, 1972, No. 3, pp. 125–127.

18. Bashkova N.V. Research on models of local stresses in telescopic boom cranes. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny*, 1977, No. 9, pp. 16–17. (In Russian).