

УДК 621.873.2/3

Численные исследования напряженно-деформированного состояния элементов стреловых самоходных кранов на железнодорожном ходу в трехмерной нестационарной постановке задачи

И. Н. Мунзаров¹, А. А. Воробьев², А. С. Ватаев², Я. С. Ватулин¹, В. С. Майоров²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Для цитирования: Мунзаров И. Н., Воробьев А. А., Ватаев А. С., Ватулин Я. С., Майоров В. С. Численные исследования напряженно-деформированного состояния элементов стреловых самоходных кранов на железнодорожном ходу в трехмерной нестационарной постановке задачи // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 112–127. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-112-127

Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Аннотация

Цель: разработана численная модель стрелового самоходного крана на железнодорожном ходу для определения напряженно-деформированного состояния основных несущих элементов металлоконструкции в трехмерной нестационарной постановке задачи. **Методы:** компьютерный эксперимент. **Результаты:** изучена динамика формирования режимов нагружения кранового оборудования при раскачивании гибкого подвеса груза в процессе трансформации ядра опорного контура в результате неравномерной просадки опор в грунт. **Практическая значимость:** разработана математическая модель железнодорожного стрелового самоходного крана, позволяющая выполнять численные исследования напряженно-деформированного состояния в трехмерной нестационарной постановке.

Ключевые слова: стреловые самоходные краны на железнодорожном ходу, динамический режим нагружения, просадка выносной опоры, динамика формирования режимов нагружения, трехмерная нестационарная постановка задачи, потеря устойчивости грунта откосного участка железнодорожного пути

Введение

Успешное решение задачи скорейшего восстановления движения при возникновении чрезвычайных ситуаций (ЧС) на ж/д инфраструктуре напрямую связано с эффективностью организации и проведения аварийно-восстановительных работ (АВР), основную часть которых составляют погрузочно-разгрузочные и монтажные операции. Ключевой особенностью выполнения данных операций является большое количество факторов, существенно влияющих на безопасность проводимых работ, не поддающихся, однако, однозначному определению в условиях недостатка времени [1, 2]. Наибольшую сложность представляют определение

параметров перемещаемого груза (масса, габариты, радиусы подъема), получение информации о состоянии грунта, наличии подземных коммуникаций и иных ограничивающих факторов.

Практика выполнения АВР показала, что основными способами обеспечения безопасной эксплуатации железнодорожных стреловых самоходных кранов (ЖССК) в данных условиях являются разработка и использование гибких проектов производства работ. Это, в свою очередь, предусматривает резервные сценарии производства работ при изменении условий в зависимости от результатов оперативной разведки на месте, осуществление поэтапного уточнения параметров груза (например, взвешивание на этапе строповки) и иных значимых факторов обеспечения безопасности и эффективности проводимых мероприятий.

Немаловажным фактором является обучение персонала работе в условиях неопределенности: проведение инструктажей и тренировок по ускоренному анализу ситуации и принятию решений в аварийных условиях с применением процедуры риск-анализа, основная задача которого сводится к выявлению потенциально опасных событий, количественной оценке вероятности их возникновения и прогнозированию их последствий.

Применение процедур риск-анализа требует, в свою очередь, формирования сценариев развития событий, сводящихся в отношении ЖССК к проработке возможных сочетаний схем нагружения. Здесь существенную помощь эксперту, осуществляющему рассмотрение спектра вероятных сценариев развития событий, могут оказать результаты численных экспериментов, выполненных на основе имитационных моделей, которые описывают реальные свойства (поведение) объекта при различных комбинациях нагружений, соответствующих штатным, пограничным и аварийным ситуациям. Значимость сценариев определяется частотой их возникновения, тяжестью последствий и синергетическим эффектом действующих факторов.

Имитационные модели или цифровые двойники, в основе которых лежит структурно-функциональная математическая модель, воспроизводят основные свойства исследуемого объекта в опорных точках состояний, определяемых совокупностью граничных условий, и позволяют выявлять зоны концентрации напряжений, оценивать запас прочности при суперпозиции нагрузок, прогнозировать отказы на основе критериев разрушения без проведения физического эксперимента. Это, в свою очередь, позволяет избегать проведения натуральных экспериментов, в ходе которых возможно достижение критических режимов функционирования конструкции ЖССК, приводящих к резкому снижению остаточного ресурса по критерию несущей способности.

Задача создания имитационных моделей ЖССК не является новой. В разное время вопросам создания цифровых двойников и методам их исследования было посвящено достаточное количество работ [1–4, 6], однако особенностью

эксплуатации ЖССК в условиях производства АВР является, как правило, недостаточное качественное состояние опорной площадки, а также высокая вероятность неопределенности параметров груза (веса, положения центра масс), связанная с изменением свойств деформированных частей перемещаемого аварийного подвижного состава. Это, в свою очередь, требует детального изучения работы крана в условиях просадок грунта и существенного изменения нагрузки на стрелу. В работах [3, 5, 7, 8] были выполнены подобные исследования, однако они либо касались штатных режимов, либо моделирование стрелы было выполнено с помощью представления ее в виде жестких секций, соединенных фиктивными шарнирами, что не позволило адекватно отразить реальную физическую картину протекающих процессов. Также следует отметить, что во многих работах не учитывается и то, что опоры ЖССК устанавливаются на балластной призме вблизи склонов, что может вызвать оползание склона и нарушить устойчивость крана. Все перечисленные обстоятельства делают актуальной цель настоящей работы — разработку имитационной модели, позволяющей получать напряженно-деформированное состояние конструкции ЖССК с учетом упруго-пластических свойств грунта и динамических процессов, происходящих при перемещении груза.

Методы исследования

Основным методом, применяемым в настоящей работе, является численное моделирование на основе метода конечных элементов (МКЭ), которое обладает существенным преимуществом по отношению как к аналитическим, так и к альтернативным численным методам [4], заключающимся в определении пространственных перемещений конструкции с учетом пластических деформаций сопряженных элементов в условиях неравномерного контакта [9, 10, 4], характерного для агрегатов ЖССК. В процессе имитационного моделирования реализуются сценарии развития неисправности с целью выявления характерных диагностических признаков предварительной фазы процесса, в частности изменения тренда контролируемых параметров объекта вследствие изменения его структуры.

В качестве объекта исследования выбран стреловой самоходный кран на железнодорожном ходу (ЖССК) «Сокол-80.01М» [11] (рис. 1 а).

Модель телескопической стрелы (ТС) крана представляет собой консольную сплошностенчатую конструкцию коробчатого сечения переменной жесткости (рис. 1 б), образованную из сопрягаемых неподвижной (корневой) (1) и подвижных секций (2, 3), из которых каждая последующая смонтирована внутри предыдущей. Подвижные секции опираются на опорные элементы (ползуны) (4), из которых одни установлены в верхней задней части внутренней секции, другие — в нижней передней части внешней секции. От бокового смещения секции удерживаются подобными боковыми упорами (5). Перемещение секций осуществляется

длинноходовыми гидроцилиндрами (ГЦ) двустороннего действия (6, 7), шарнирно связанными с телескопируемыми секциями неподвижными (3), и скользящими (2) опорами. Изменение углового положения стрелового оборудования осуществляется посредством спаренных гидроцилиндров (8). Поворотная и крановая рамы выполнены сварными сплошностенчатыми конструкциями коробчатого сечения, сопряженными опорно-поворотным устройством в виде подшипника (3). Портал поворотного устройства имеет узлы шарнирного соединения с корневой секцией стрелы (1) и гидроцилиндрами изменения вылета стрелы (2). Крановая рама имеет четыре гидрофицированные выносные опоры флюгерного типа (4).

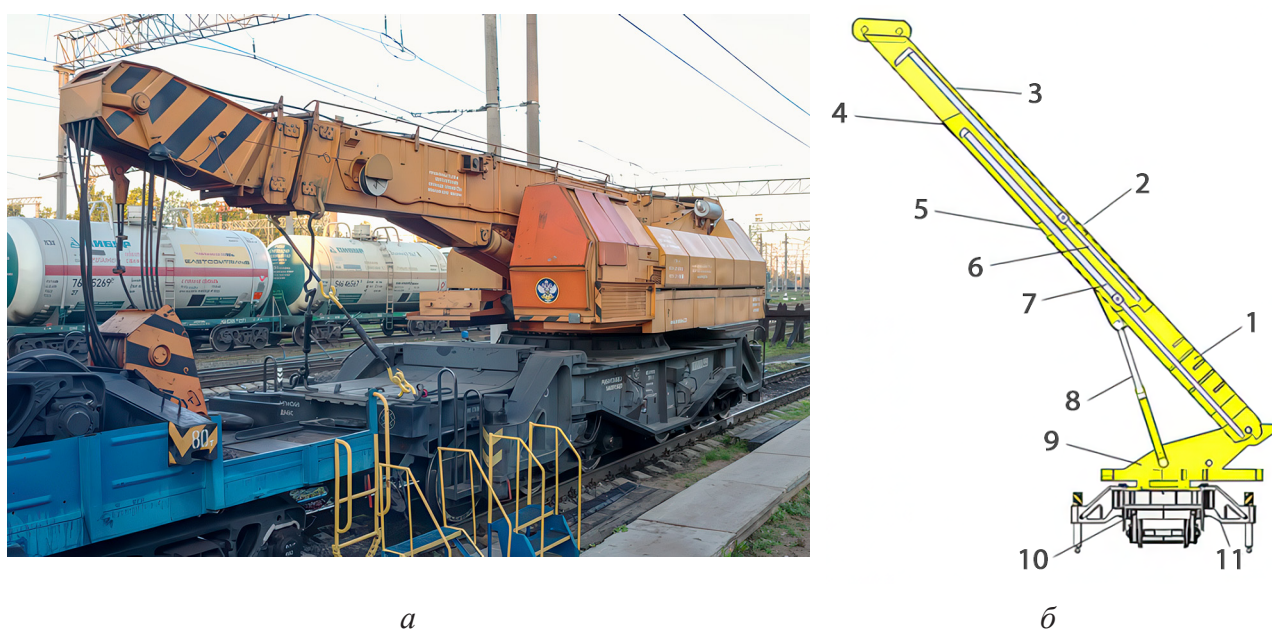


Рис. 1. Стреловой самоходный кран на железнодорожном ходу «Сокол-80.01М»: *а* — общий вид (фото А. В. Яшкова); *б* — имитационная модель (силовая установка, капот и кабина управления не показаны)

Особенностью конструкции данного крана является то, что в корпусе средней секции стрелы находятся два консольно-закрепленных гидроцилиндра, обладающих высокой гибкостью при длине 9 м и диаметре 0,185 м [12] (рис. 2). Свободные колебания консолей этих элементов создают значительный дополнительный изгибающий момент в сопряженном штоке ГЦ, а также разнонаправленные реакции в шарнирах крепления цапфы цилиндра к секции стрелы, что вызывает местную деформацию сечений стенок секций, подверженных осевым нагрузкам. При этом контактные усилия (рис. 2 *а*) в сопряжении «поршень — гильза» функционально зависят от величины выхода штока и угла перекоса ступеней в процессе свободных колебаний консольно-закрепленных гильз.

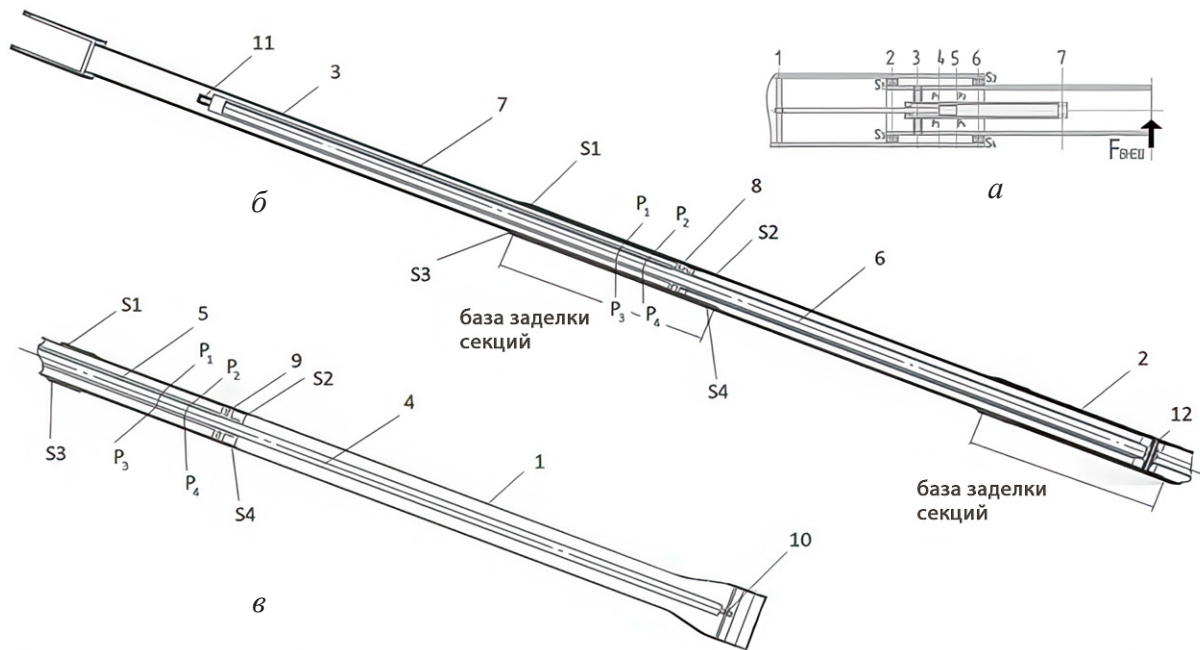


Рис. 2. Принципиальное и конструктивное устройство стрелового оборудования ЖССК:

- 1 — секция корневая; 2 — шарнир телескопического сопряжения;
 3 — секция концевая; 4 — шток ГЦ промежуточной секции; 5 — гильза ГЦ промежуточной секции; 6 — шток ГЦ концевой секции; 7 — гильза ГЦ концевой секции; 8 — цапфа гильзы ГЦ промежуточной секции; 9 — цапфа ГЦ концевой секции; 10 — шарнир крепления штока ГЦ промежуточной секции; 11 — подвижная опора ГЦ концевой секции;
 12 — шарнир гидроцилиндра телескопирования

Как известно, стрела крана — это система с распределенными параметрами, в которой динамические нагрузки возникают в результате взаимодействия сил инерции и сил упругости элементов [3, 4, 13]. Инерционные нагрузки обусловлены динамическими процессами, которые вызваны воздействием вертикальных инерционных сил, возникающих при ускоренном или замедленном подъеме/опускании груза, просадке опор крана, кратковременном инерционном импульсе, приводящем к забросу секций стрелы при обрыве троса или резком снижении массы груза, а также горизонтальных сил, связанных с изменением скорости вращения поворотной платформы. Эти явления могут вызвать раскачивание груза, что, в свою очередь, становится причиной появления дополнительных вертикальных и горизонтальных сил.

С целью повышения адекватности разрабатываемой имитационной модели здесь учитывается особенность силового взаимодействия секций стрелы с элементами ГЦ, а именно многоопорная схема контактирования с переменной

податливостью с двусторонней и односторонней связью. Так, в зависимости от направления действия инерционной силы и расположения плоскости вращения шарнира (12), цапфы (8) (рис. 2 *a*) элемент системы «ТС — ГТС» оказывается либо заземленным в сечении (3), то есть является консолью, либо не обеспечивает противодействия в данном направлении — является шарнирно-опертым элементом, опорой с односторонней связью.

Для учета изменения во времени граничных условий при выполнении исследований на каждом временном шаге задаются внешние силы (векторные нагрузки, распределенные давления), кинематические ограничения (перемещения опор, скорости выдвижения секций), контактные условия (затягивание/ослабление соединений) и на этой основе методом шагового интегрирования вычисляются напряжения и деформации с проверкой превышения предела текучести материала и корректировкой величин пластических деформаций и жесткости элементов [14]. Для задания пластических деформаций во времени используются модели пластичности Прандтля — Рейса, а также критерии текучести Треска и Мизеса.

При моделировании напряженно-деформированных состояний ЖССК используются следующие допущения и упрощения:

1. Материал элементов является однородным и изотропным и имеет следующие характеристики [15]: модуль Юнга $2 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона 0,31, предел текучести 340 МПа, модуль пластичности 1,5 ГПа.

2. Все отверстия и валы в начальный момент времени являются цилиндрическими.

3. Деформации подчиняются закону Гука. Пластические деформации отсутствуют.

4. Свойства грунта моделируются с помощью модели Мора — Кулона по методике, изложенной в [3].

5. Шпальная выкладка представляет собой однородный материал. Силы внутреннего трения между ее составными частями, а также взаимные перемещения шпал при нагружении не учитываются.

6. Каждая секция моделируется как упругое тело.

7. Узлы соединения представляют с помощью шарниров с заданными степенями свободы, контактных элементов, а также упруго-демпферных связей для имитации податливости креплений.

8. Перед началом исследования предполагаем, что зазоры между контактирующими элементами отсутствуют. Проскальзывание в направляющих не учитывается.

В задачах исследования режимов динамического нагружения телескопических стрел одним из важнейших аспектов является корректное представление внешнего воздействия на конструкцию. В существующих моделях [16, 17]

канатный подвес чаще всего заменяется сочетанием силовых факторов, приложенных к оголовку стрелы, либо представляется одноканатным маятниковым подвесом с точечным креплением на оголовке стрелы.

Практика эксплуатации и исследования кранов показывает, что нагружение оголовка ЖССК осуществляется следующим образом: в начале процесса нормальная составляющая весовой нагрузки подвеса передается на ручей направляющего блока оголовка стрелы. Составляющая весовой нагрузки из плоскости подвеса воздействует на реборду блока, вызывая кручение секции, а затем выбираются зазоры в телескопическом сочленении секций 1, 2, 3 (рис. 1 б). Далее возникает изгибная деформация концевой секции под действием инерционной силы. Наконец, колебания передаются на гильзу гидроцилиндра телескопирования через цапфовое соединение (8, 9) (рис. 2 б). По завершении процесса выборки зазоров в сочленениях горизонтальная инерционная нагрузка передается через боковые, диагонально расположенные направляющие упоры непосредственно на стенки узла телескопического сочленения последующей секции. При этом активация каждого узла происходит только после накопления достаточной энергии в системе. Фазы колебаний секций стрелы и гильзы ГЦ могут совпадать, при этом контактные напряжения возрастают или могут оказываться в противофазе, в этом случае контакт подвижной опоры с секцией стрелы может временно отсутствовать.

Наиболее корректный вариант моделирования процесса нагружения стрелы предложен в работе [18], где подвес представлен пространственной упруго-податливой конструкцией с жесткостными характеристиками, полученными в соответствии с руководством по эксплуатации крана [11]. Однако в этой модели не учитывается возможное ослабление одного или нескольких подъемных канатов при раскачивании подвеса.

Известно, что при раскачивании груза возникает боковая составляющая N , вызывающая инерционное смещение подвеса груза из плоскости качания стрелы. Она воспринимается ребордой ручья блока (рис. 3 в) и представляется в виде осевой нагрузки K . При этом ось блоков оказывается загруженной неравномерно, реакции в опорах оси становятся неодинаковыми, что приводит к появлению дополнительного момента скручивания оголовка концевой секции. В предлагаемой модели наличие рассмотренного выше скручивающего момента учитывается путем представления системы тросов и полиспада в виде кольцевых упругих элементов (3), имитирующих упруго-жесткостные свойства грузового каната и передающих весовую нагрузку (1) на оголовки концевой секции стрелы (4) через систему подвижных и неподвижных блоков (2) (рис. 3 б).

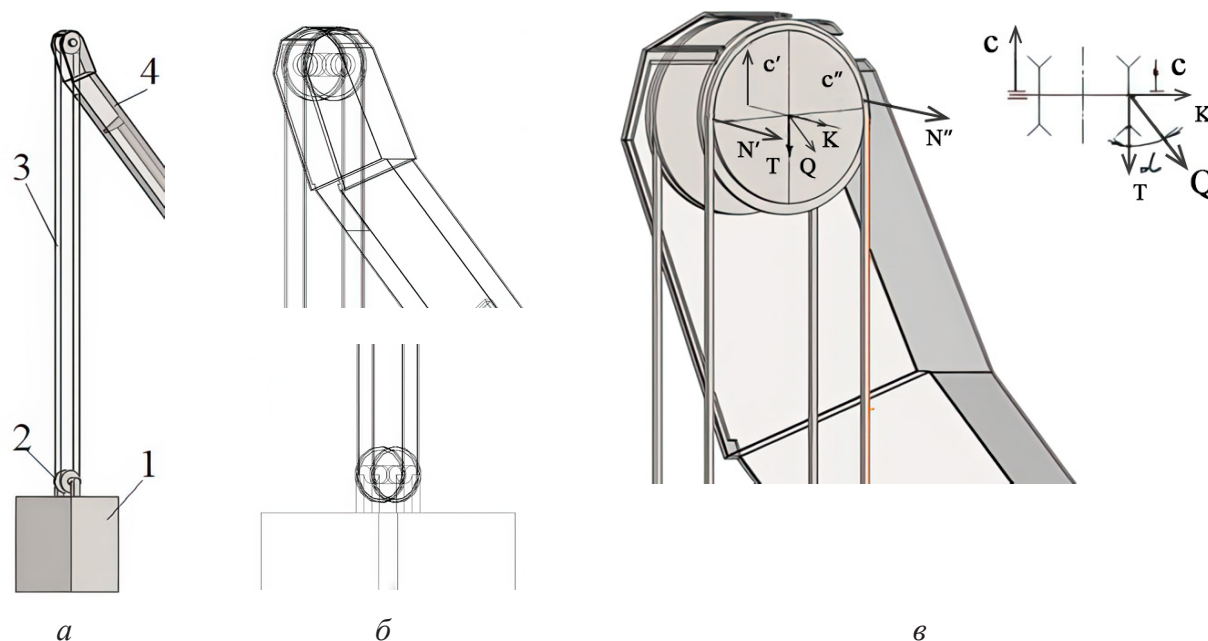


Рис. 3. Методика моделирования конструктивного устройства полиспаста: *а* — общий вид контактирующих элементов; *б* — представление канатов в виде кольцевых упругих элементов; *в* — распределение инерционных сил при раскачивании груза

Моделирование условия вывешивания ЖССК на земляном сооружении насыпи железнодорожного пути

К особенностям производства погрузочно-разгрузочных работ с помощью ЖССК следует отнести особые условия вывешивания ЖССК на земляном сооружении насыпи железнодорожного пути. Габариты поверхности основной площадки земляного полотна недостаточны для устройства опорного контура грузоподъемной машины [19], поэтому с целью увеличения опорной площади на нулевом месте земляного полотна производится устройство шпальной выкладки 3–5 слоев (рис. 4) [19]: выполняется ступенчатое срубание откоса до получения ровной площадки, выкладывается шпальная решетка необходимой высоты. Для предотвращения смещения слоев клетки и ее депланации производятся сбивание решетки скобами и отсыпка щебнем, согласно требованиям [19], предписывающим получение плотности присыпки не ниже 95 % максимальной плотности, полученной при стандартном уплотнении, в глубину — не ниже 90 %.

Практика эксплуатации ЖССК показывает наличие неравномерного внедрения шпальных выкладок в грунт (под углом к поверхности), что вызывает скольжение опорного башмака аутригера вдоль контактной поверхности со шпальной выкладкой [3, 4, 20]. Вследствие данного явления центр сферической опоры штока смещается относительно геометрической оси гидроцилиндра (ГЦ) аутригера, возникает эксцентриситет приложения осевой нагрузки, что приводит к появлению

поперечных усилий в конструкции ГЦ. Напряжения в корпусных элементах перераспределяются: зоны, рассчитанные на осевую нагрузку, испытывают изгибные и сдвиговые деформации [8, 19, 21, 22].

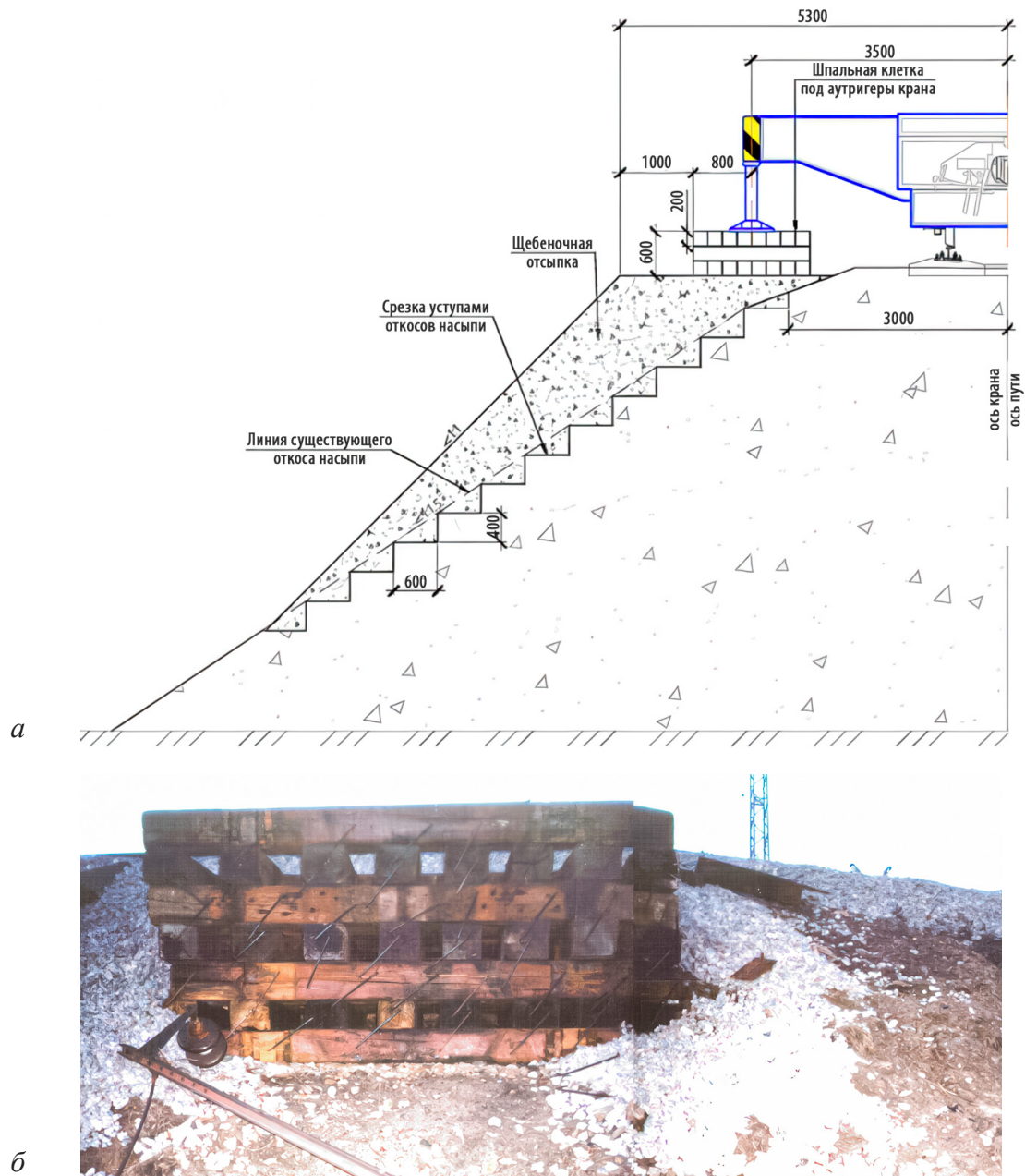


Рис. 4. Шпальная выкладка с производством срубания откоса земляного полотна:
а — устройство принципиальное; *б* — практическая реализация (фото Д. Е. Попова)

Наиболее совершенная реологическая модель шпальной клетки и грунта представлена в работе [3, 6] пространственной схемой вертикально и наклонно расположенных моделей Кельвина — Фойгта, состоящих из упругой пружины и вязкого элемента (демпфера) [21], а также специальных моделей Кельвина — Фойгта,

работающих только на сжатие. В совокупности данные устройства моделируют упругие свойства основания и сопротивление сдвиговым нагрузкам с учетом пластических свойств податливых элементов.

Однако известные модели не могут адекватно учитывать сложную внутреннюю структуру откосного участка опорного сооружения, а также существующую тенденцию изменения плотности среды в направлении периферии, что должно отражаться на эпюре полей напряжений поперечного сечения в виде соответствующих смещений переуплотненных зон в сторону образующей откосной поверхности. В частности, реальное поведение откосного участка железнодорожного пути, нагруженного в области бровки призмы земляного полотна, сопровождается явлениями потери устойчивости грунта, оползания и скольжения.

Поведение откосного участка железнодорожного пути под воздействием динамической нагрузки опорного узла наиболее корректно описывается методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения, разработанным В. В. Соколовским [7]. На эпюрах векторного представления ускорений материала среды в теле призмы очевидно отображается формирующийся профиль круглоцилиндрических поверхностей скольжения (рис. 5 *а*), по которым происходит оползание породы.

Возникающие при ударном нагружении упруго-пластические волны (продольные, поперечные, поверхностные волны Реллея), интерферируя, образуют зоны концентрации напряжений, резонансные усиления, градиенты скоростей деформаций. Тенденции изменения местоположения зоны резонансных усилий, возникающих в грунте, определяют характерные очаги сдвига и зоны уплотнений (рис. 5 *б*), которые коррелируют с наблюдаемыми на практике.

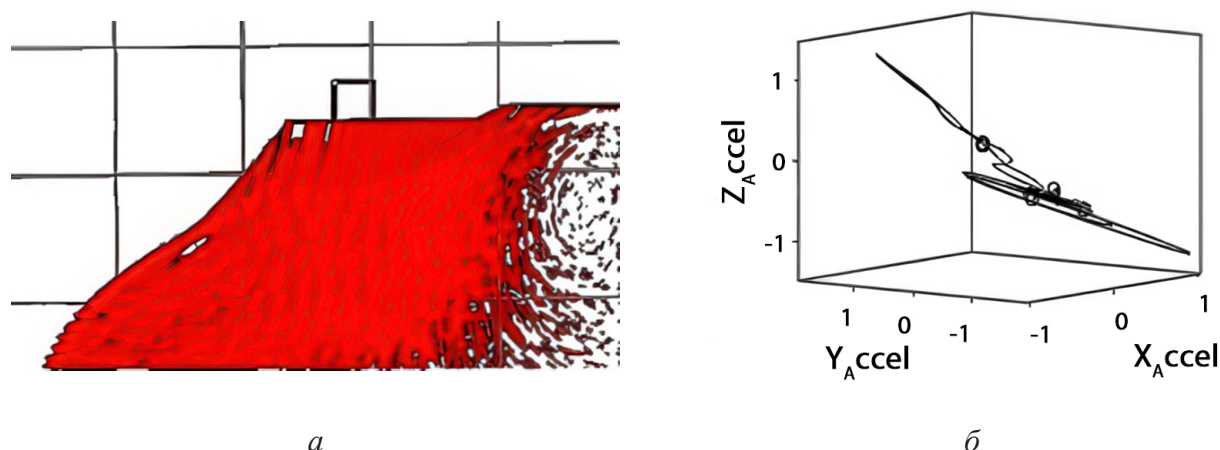


Рис. 5. Динамическое взаимодействие максимально нагруженной шпальной выкладки и откосной зоны земляного полотна: *а* — векторное представление ускорений; *б* — годограф перемещений точки контакта оголовка штока аутригера со шпальной выкладкой

Для корректного отражения местного динамического взаимодействия опорных устройств ЖССК и бровки откоса используется модель упрочняющегося грунта (HS) [22], являющаяся усовершенствованной моделью Мора — Кулона, созданной путем объединения нелинейных упругих и упругопластических моделей для реалистичного моделирования глинистых и песчаных грунтов. Главной особенностью модели HS является принятая гиперболическая зависимость между девиатором напряжений и относительной деформацией при первичном трехосном нагружении, а при разгрузке и повторном нагружении зависимость принимается линейной.

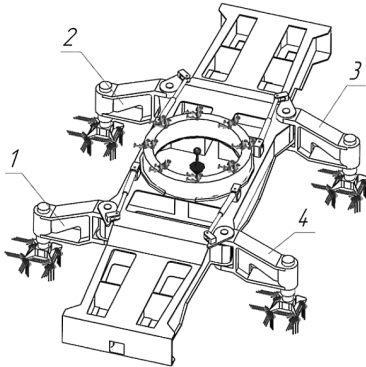
Полученная расчетная траектория перемещений (годограф) (рис. 5 б) точки контакта оголовка штока аутригера со шпальной выкладкой показывает диапазон изменения значений по отведениям в пределах 2 мм, что не превышает предельно допустимые деформационные смещения (5 мм) точки контакта относительно геометрической оси аутригера [1, 4, 20, 23].

Верификация численной модели ЖССК

Подтверждение корректного отражения физической реальности разработанной численной модели ЖССК «Сокол-80.01М» в настоящей работе выполнено путем сравнения результирующих сил (значений реакций выносных опор крановой установки), указанных в паспортных характеристиках крана, со значениями, полученными в ходе численного эксперимента в условиях адекватных внешних воздействий. Указанный параметр принят по следующим причинам: это интегральный показатель нагруженности всей конструкции; он напрямую связан с устойчивостью крана, нормируется в паспорте как критические параметры безопасности.

Значения реакций опор R_1, R_2, \dots, R_n для конкретных режимов работы определяются по результатам численного моделирования с учетом условий испытаний (грузовой момент M , вылет стрелы L , масса груза Q , положение опор) и соответствующих паспортных значений опорных реакций (см. табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Процент отклонения опорных реакций ЖССК
(паспорт крана / цифровая модель)

	№ аутригера	Вылет стрелы 10 м, груз 20 т		Вылет стрелы 17 м, груз 10 т	
		Паспорт / модель	% отклонения	Паспорт / модель	% отклонения
	№ 2, 3	515 kN / 511 kN	0,77	490 kN / 481 kN	1,83
	№ 1, 4	170 kN / 164 kN	3,53	145 kN / 158 kN	8,96

Расхождения значений опорных реакций находятся в допустимых пределах (менее 10%), модель считается верифицированной для заданных условий.

Заключение

Разработанная численная модель позволяет:

- строить единую численную модель всей системы (ЖССК — опорное сооружение), избегая потерь и искажений информации при раздельном анализе подсистем с последующей передачей граничных условий в следующую модель;
- описывать пространственные перемещения сопряженных элементов с учетом геометрии и кинематики сочленений, упруго-пластических деформаций;
- учитывать условия опирания крана на грунт, вводить структурные нелинейности (контакт, пластичность);
- отслеживать эволюцию конструкции в целом путем внесения изменений граничных условий на каждом шаге расчета;
- осуществлять подмоделирование (детальный анализ критических узлов в отдельной модели с граничными условиями из глобальной схемы).

Список источников

1. Распоряжение ОАО «РЖД» от 01.10.2019 № 2182/р «Об утверждении и вводе в действие инструктивных указаний по организации аварийно-восстановительных работ на инфраструктуре ОАО «РЖД» // СПС «КонсультантПлюс». 144 с.
2. Huber W. Tragfähigkeit von Teleskopen // *Forder und Heben*. 1972. No. 3. S. 125–127.
3. Потахов Д. А. Методы анализа состояния элементов опорного контура и устойчивости грузоподъемных кранов в процессе ненормируемого динамического нагружения: дисс. ... канд. техн. наук. СПб, 2021. 190 с.
4. Потахов Е. А. Методы оценки динамического нагружения элементов телескопического стрелового оборудования грузоподъемных кранов: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2022. 168 с.
5. Анцев В. Ю., Витчук П. В., Крылов К. Ю. Дефекты и отказы автомобильных кранов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2016. № 7–1. С. 88–93.
6. Нагруженность крановых телескопических стрел / В. А. Ряхин [и др.] // *Строительные и дорожные машины*. 1984. № 6. С. 9–11.
7. Пьянков С. А., Азизов З. К. *Механика грунтов: учебное пособие*. Ульяновск: УлГТУ, 2014. 169 с.
8. Шелмич Р. Р. Динамические нагрузки и устойчивость автокрана на упругом основании // *Строительные и дорожные машины*. 1996. № 4. С. 32–33.
9. Башкова Н. В. Исследование местной нагруженности телескопических стрел строительных кранов: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1978. 223 с.

10. Абрамович И. И., Березин В. Н., Яуре А. Г. Грузоподъемные краны промышленных предприятий: справочник. М.: Машиностроение, 1989. 360 с.
11. Паспорт восстановительного поезда: форма РБУ-4: утв. ОАО «РЖД» 21.06.2004 // СПС «КонсультантПлюс».
12. 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.
13. Соломатина Л. А. Динамика поворота гидравлических стреловых самоходных кранов: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1984. 239 с.
14. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.: ДМК Пресс, 2010. 464 с.
15. Исследование экстремальных режимов работы транспортных систем средствами SolidWorksMotion / Я. С. Ватулин [и др.] // Системы автоматизированного проектирования на транспорте, Санкт-Петербург, 17–19 апреля 2017 года. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2017. С. 28–43.
16. 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.
17. ГОСТ 3241-91. Канаты стальные. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2007. 21 с.
18. Смирнов А. С., Смольников Б. А. Движение сферического маятника со слабой нелинейностью при наличии внешнего или внутреннего трения // Современное машиностроение: Наука и образование — 2024: материалы 13-й Международной научной конференции (20 июня 2024 г.) / под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. СПб.: Политех-Пресс, 2024.
19. Савинов О. А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Стройиздат, 1979. 200 с.
20. Ватулин Я. С. Синтез силовых гидроцилиндров строительных кранов: дисс. ... канд. техн. наук. Тула, 1996. 223 с.
21. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наук. думка, 1976. 415 с.
22. Сокорнов А. А., Коньков А. Н. Моделирование и расчет подземных сооружений. Механические модели грунтов и строительных материалов: учеб. пособ. СПб.: СПГУПС, 2022.
23. Липатов А. С., Емельянова Г. А. Об учете ненормируемых условий эксплуатации при назначении показателей риска грузоподъемных кранов // Механизация строительства. 2014. № 5. С. 60–64.

Дата поступления: 02.12.2025

Решение о публикации: 11.02.2026

Контактная информация:

МУНЗАРОВ Илшат Назибович — аспирант; nttk@pgups.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, профессор; nttk@pgups.ru

ВАТАЕВ Андрей Сергеевич — канд. техн. наук, доцент; avataev@yandex.ru

ВАТУЛИН Ян Семенович — канд. техн. наук, доцент; yan-roos@yandex.ru

МАЙОРОВ Владимир Сергеевич — канд. техн. наук, доцент; nttk@pgups.ru

Numerically modelled stress-strain state of rail-mounted jib crane within a three-dimensional non-stationary framework

I. N. Munzarov¹, A. A. Vorobyov², A. S. Vatayev², Ya. S. Vatulin¹, V. S. Mayorov²

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

² Saint Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russia

For citation: *Munzarov I. N., Vorobyov A. A., Vatayev A. S., Vatulin Ya. S., Mayorov V. S.* Numerically modelled stress-strain state of rail-mounted jib crane within a three-dimensional non-stationary framework // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 112–127. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-112-127. (In Russian)

Abstract

Objective: a numerical model of a rail-mounted mobile boom crane was developed to determine the stress-strain state of the main load-bearing components of the metal structure within a three-dimensional non-stationary framework. **Methods:** computer-based simulation and numerical experimentation. **Results:** the dynamics of crane loading regimes associated with oscillations of a flexible load suspension induced by uneven settlement of ground supports and by transformations in the core of the support contour. **Practical Significance:** the proposed mathematical model of the rail-mounted mobile boom crane facilitates numerical investigation of the stress-strain behaviour of its structural elements in a three-dimensional non-stationary framework.

Keywords: rail-mounted self-propelled boom cranes, dynamic loading regime, outrigger settlement, loading regime dynamics, three-dimensional non-stationary setting, loss of soil stability in a sloped section of a railway track

References

1. Rasporyazhenie OAO “RZhD” ot 01.10.2019 no. 2182/r “Ob utverzhdenii i vvode v dejstvie Instruktivnykh ukazanij po organizatsii avarijno-vosstanovitel’nykh работ na infrastrukture OAO “RZhD” // SPS “Konsul’tantPlyus”. 144 s. (In Russian)
2. Huber W. Tragfahigkeit von teleskopen // Forder und Heben. 1972. No. 3. S. 125–127.
3. Potakhov D.A. Metody analiza sostoyaniya elementov opornogo kontura i ustojchivosti gruzopod’emnykh kranov v protsesse nenormiruemogo dinamicheskogo nagruzheniya: diss. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2021. 190 s. (In Russian)

4. Potakhov E. A. *Metody otsenki dinamicheskogo nagruzheniya elementov teleskopicheskogo strelovogo oborudovaniya gruzopod'emnykh kranov: diss. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2022. 168 s. (In Russian)*
5. Antsev V. Yu., Vitchuk P. V., Krylov K. Yu. *Defekty i otkazy avtomobil'nykh kranov // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2016. No. 7–1. S. 88–93. (In Russian)*
6. *Nagruzhenost' kranovykh teleskopicheskikh strel / V. A. Ryakhin [i dr.] // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 1984. No. 6. S. 9–11. (In Russian)*
7. P'yankov S. A., Azizov Z. K. *Mekhanika gruntov: uchebnoe posobie. Ul'yanovsk: UIGTU, 2014. 169 s. (In Russian)*
8. Shelmich R. R. *Dinamicheskie nagruzki i ustojchivost' avtokrana na uprugom osnovanii // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 1996. No. 4. S. 32–33. (In Russian)*
9. *Bashkova N. V. Issledovanie mestnoj nagruzhenosti teleskopicheskikh strel stroitel'nykh kranov: diss. ... kand. tekhn. nauk. M., 1978. 223 s. (In Russian)*
10. Abramovich, I. I., Berezin V. N., Yaure A. G. *Gruzopod'emnye krany promyshlennykh predpriyatij: spravochnik. M.: Mashinostroenie, 1989. 360 s. (In Russian)*
11. *Pasport vosstanovitel'nogo poezda: forma RBU-4: utv. OAO "RZhD" 21.06.2004 // SPS "Konsul'tantPlyus". (In Russian)*
12. *Vajnsjon A. A. Pod'emno-transportnye mashiny: uchebnik dlya vuzov po spetsial'nosti "Pod'emno-transportnye, stroitel'nye, dorozhnye mashiny i oborudovanie". 4-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1989. 536 s. (In Russian)*
13. *Solomatina L. A. Dinamika povorota gidravlicheskikh strelovykh samokhodnykh kranov: diss. ... kand. tekhn. nauk. M., 1984. 239 s. (In Russian)*
14. *Alyamovskij A. A. Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation. M.: DMK Press, 2010. 464 s. (In Russian)*
15. *Issledovanie ekstremal'nykh rezhimov raboty transportnykh sistem sredstvami SolidWorksMotion / Ya. S. Vatulin [i dr.] // Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya na transporte, Sankt-Peterburg, 17–19 aprelya 2017 goda. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2017. S. 28–43. (In Russian)*
16. *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.*
17. *GOST 3241–91. Kanaty stal'nye. Tekhnicheskie usloviya. M.: Izdatel'stvo standartov, 2007. 21 s. (In Russian)*
18. *Smirnov A. S., Smol'nikov B. A. Dvizhenie sfericheskogo mayatnika so slaboj nelinejnost'yu pri nalichii vneshnego ili vnutrennego treniya goda / Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie — 2024: materialy 13-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii (20 iyunya 2024 g.) / pod red. A. N. Evgrafova i A. A. Popovicha. SPb.: Politekh-Press, 2024. (In Russian)*
19. *Savinov O. A. Sovremennye konstruksii fundamentov pod mashiny i ikh raschet. 2-e izd., pererab. i dop. L.: Strojizdat, 1979. 200 s. (In Russian)*

20. Vatulin Ya. S. Sintez silovykh gidrotsilindrov stroitel'nykh kranov: diss. ... kand. tekhn. nauk. Tula, 1996. 223 s. (In Russian)
21. Pisarenko G. S., Lebedev A. A. Deformirovanie i prochnost' materialov pri sloznom napryazhenom sostoyanii. Kiev: Nauk. dumka, 1976. 415 s. (In Russian)
22. Sokornov A. A., Kon'kov A. N. Modelirovanie i raschet podzemnykh sooruzhenij. Mekhanicheskie modeli gruntov i stroitel'nykh materialov: ucheb. posob. SPb. PGUPS, 2022. (In Russian)
23. Lipatov A. S., Emel'yanova G. A. Ob uchete nenormiruemykh uslovij ekspluatatsii pri naznachenii pokazatelej riska gruzopod'emnykh kranov // Mekhanizatsiya stroitel'stva. 2014. No. 5. S. 60–64. (In Russian)

Received: 02.12.2025

Accepted: 11.02.2026

Author's information:

Ilshat N. MUNZAROV — Postgraduate Student; nttk@pgups.ru

Alexander A. VOROBIEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; nttk@pgups.ru

Andrey S. VATAEV — PhD in Engineering, Associate Professor; avataev@yandex.ru

Yan S. VATULIN — PhD in Engineering, Associate Professor; mayorov.pgups@gmail.com

Vladimir S. MAYOROV — PhD in Engineering, Associate Professor; nttk@pgups.ru