

УДК (UDC) 621.873

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСФОРМАЦИИ НАГРУЖЕНИЯ  
ОПОРНОГО КОНТУРА ГРУЗОПОДЪЕМНОГО КРАНАEXPERIMENTAL STUDIES OF LOAD TRANSFORMATION OF THE SUPPORT  
CONTOUR OF A LOAD-LIFTING CRANEПотахов Д.А.<sup>1</sup>, Ватулин Я.С.<sup>2</sup>  
Potakhov D.A.<sup>1</sup>, Vatulin J.S.<sup>2</sup><sup>1</sup> – АО «Петербургский тракторный завод» (Санкт-Петербург, Россия)<sup>2</sup> – Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (Санкт-Петербург, Россия)<sup>1</sup> – JSC Peterburgsky Tractorny Zavod (St. Petersburg, Russian Federation)<sup>2</sup> – Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (St. Petersburg, Russian Federation)

**Аннотация.** Одной из особенностей работы стреловых самоходных кранов является балансирование грузоподъемного крана на выносных опорах т.е. циклическое нагружение и разгрузка опор крана в зависимости от азимутального положения поворотной части крана с грузом. Однако данный процесс в технической литературе освещен не в полном объеме. Цель исследования: изучение процесса трансформации (изменения) нагружения опорного контура стрелового самоходного крана, находящегося в динамическом режиме нагружения; в качестве основного параметра, характеризующего процесс трансформации опорной базы стрелового самоходного крана, выбраны зависимости реакций опор во времени. Методы: аналитический расчет зависимостей реакций опор стрелового самоходного крана во времени из параметров напряженно-деформируемого состояния гидроцилиндра вывешивания, которые определены при помощи тензометрического метода в экспериментальных исследованиях динамического нагружения стрелового самоходного крана при изменении нагружения опорного контура. Обработка полученных данных проводилась согласно теории вероятности и математической статистике. Экспериментальные исследования проводились на реальном грузоподъемном кране – стреловом автомобильном кране типа КС-45717. Результаты: представлен анализ экспериментальных исследований динамического нагружения грузоподъемного крана в части изменения нагружения опорного контура. В результате проведенного анализа сделан вывод, что при вращении поворотной части крана с грузом происходила трансформация нагружения опорного контура грузоподъемного крана (балансирование) – последовательное циклическое нагружение и разгрузка опор крана. В проводимых экспериментальных исследованиях определено пространственное положение центра масс системы «грузоподъемный кран – груз». В рамках исследования гидроцилиндра вывешивания определены параметры распределения напряженно-деформируемого состояния цилиндра (корпуса) гидроцилиндра в функции времени.

**Abstract.** One of the features of operation of self-propelled boom cranes is balancing of the hoisting crane on outriggers, i.e. cyclic loading and unloading of the crane supports depending on the azimuthal position of the rotating part of the crane with the load. However, this process is not fully covered in the technical literature. Objective of the study: to study the process of transformation (change) of the loading of the support contour of a self-propelled boom crane in a dynamic loading mode; as the main parameter characterizing the process of transformation of the support base of a self-propelled boom crane, the dependencies of the support reactions in time are selected. Methods: analytical calculation of the dependencies of the support reactions of a self-propelled boom crane in time from the parameters of the stress-strain state of the hanging hydraulic cylinder, which are determined using the strain gauge method in experimental studies of dynamic loading of a self-propelled boom crane with a change in the loading of the support contour. The obtained data were processed according to probability theory and mathematical statistics. The experimental studies were conducted on a real overhead crane – a boom truck crane of the KS-45717 type. Results: the analysis of experimental studies of the dynamic loading of the overhead crane is presented in terms of changing the loading of the support contour. As a result of the analysis, it was concluded that when the rotating part of the crane with a load rotated, the loading of the support contour of the overhead crane was transformed (balancing) – sequential cyclic loading and unloading of the crane supports. In the conducted experimental studies, the spatial position of the center of mass of the "overhead crane – load" system was determined. As part of the study of the hanging hydraulic cylinder, the parameters of the distribution of the stress-strain state of the cylinder (housing) of the hydraulic cylinder as a function of time were determined.

**Ключевые слова:** стреловой самоходный кран, опорный контур, динамическое нагружение, тензометрия, устойчивость.

**Дата получения статьи:** 13.01.2025  
**Дата принятия к публикации:** 05.02.2025  
**Дата публикации:** 25.03.2025

#### Сведения об авторах:

**Потахов Денис Александрович** – кандидат технических наук, начальник бюро управления главного технолога АО «Петербургский тракторный завод», *e-mail: potakhovd@mail.ru*.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3734-6860>

**Ватулин Ян Семенович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», *e-mail: yan-roos@yandex.ru*.

**Keywords:** jib self-propelled crane, support contour, dynamic loading, strain gauge, stability.

**Date of manuscript reception:** 13.01.2025  
**Date of acceptance for publication:** 05.02.2025  
**Date of publication:** 25.03.2025

#### Authors' information:

**Denis A. Potakhov** – Candidate of Technical Sciences, Head of the Bureau of the Chief Technologist's Office of JSC Peterburgsky Tractory Zavod, *e-mail: potakhovd@mail.ru*.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3734-6860>

**Jan S. Vatulin** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department «Ground transport and technological complexes» at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, *e-mail: yan-roos@yandex.ru*.

## 1. Введение

Согласно [1] около половины аварий при эксплуатации строительных кранов приходится на опрокидывание кранов. Устойчивость свободно стоящих кранов, обеспечиваемая исключительно их собственной массой, при эксплуатации во многом определяется конструкцией элементов опорного контура, который включает в себя опорную (несущую) раму и выносные опоры (аутригеры). Конструктивное исполнение опорного контура предопределяет несущую способность элементов и устойчивость крана в целом, что задает основной эксплуатационный параметр крана – грузовую характеристику.

Наиболее распространенное конструктивное исполнение опорного контура стрелового самоходного крана – четырехточечное [1]. Распределение нагрузок между опорами стреловых самоходных кранов в процессе эксплуатации преимущественно зависит от пространственного положения центра масс системы «грузоподъемный кран – груз» в процессе вращения поворотной части крана. В связи с этим рабочая опорная площадка и выносные опоры (аутригеры) испытывают переменный (циклический) режим нагружения.

Неподвижность конструкции под действием нагрузок обеспечивается благодаря наличию опор; в опорах возникают реакции, которые вместе с заданными нагрузками

представляют уравновешенную систему сил, действующих на конструкцию [2].

Согласно базовому математическому принципу плоскость может быть задана через три точки, не лежащие на одной прямой [3]. Ввиду этого стреловой самоходный кран часто имеет трехточечную опорную схему опирания с отрывом (или положением соприкосновения к этому состоянию) наименее нагруженной опоры (четвертой, для кранов с четырьмя выносными опорами) от опорной поверхности [1, 4, 5]. В связи с этим в процессе вращения поворотной части стреловых самоходных кранов происходит циклический процесс трансформации нагружения опорного контура, т.е. процесс последовательного нагружения-разгружения опор крана, носящий циклический характер, зависящий от режима работы грузоподъемной машины и технологического процесса проведения погрузочно-разгрузочных работ на конкретной рабочей площадке.

Исследования конструкций и элементов подъемно-транспортных машин являются эффективным средством совершенствования методов их расчета и выбора наиболее рациональных конструктивных исполнений [4]. Основными задачами исследования эксплуатационных режимов работы грузоподъемного крана является: обеспечение устойчивости крана, определение действующих динамических нагрузок, определение влия-

ния нагрузок на конструктивные элементы и параметры работы крана, оценка и минимизация энергетических и экономических затрат при эксплуатации кранов [1, 6 - 10]. Однако в данных исследованиях не уделено должного внимания экспериментальным исследованиям на натурном образце грузоподъемного крана, чаще всего применяется математическое и/или физическое моделирование работы кранов. Исследование же натуральных объектов грузоподъемных кранов по сравнению с исследованиями их моделей дают возможность получения более обширной и достоверной информации о параметрах работы конструкции и механизмов особенно в условиях их динамического нагружения [4]. При экспериментальных исследованиях натуральных объектов в целях анализа параметров их напряженно-деформированного состояния широко используется метод тензометрических испытаний [4].

Получение данных о действительной нагруженности конструкции подъемно-транспортной машины в характерных условиях ее эксплуатации, требующих непрерывной регистрации ее напряженного состояния в течение длительного промежутка времени, очень трудоемко. Поэтому в данном исследовании для анализа основных характеристик процесса трансформации нагружения опорного контура грузоподъемного крана рассматривается только операция «вращение поворотной части крана с грузом», являющейся одной из типовых операций при эксплуатации грузоподъемного крана.

## 2. Предмет, задачи и методы

### 2.1. Подготовка к проведению эксперимента

Целью экспериментальных исследований является анализ процесса изменения нагружения опорного контура стрелового самоходного крана в результате вращения поворотной части крана с грузом. Задачей является – установление основных характеристик процесса трансформации нагружения опорного контура грузоподъемного крана. Для этого предусматривается проведение натурального эксперимента на автомобильном кране.

В качестве основного параметра, характеризующего процесс трансформации опорной базы стрелового самоходного крана, выбраны зависимости реакций опор во времени, которые получены аналитическим выводом из параметров напряженно-деформируемого состояния наружной поверхности гидроцилиндра вывешивания. Параметры напряженно-деформируемого состояния наружной поверхности гидроцилиндра в текущем исследовании определены при помощи тензометрического метода, основанного на изменении электрического сопротивления проводника при его растяжении или сжатии [1, 4, 11].

В эксперименте использовалась следующее оборудование:

- универсальный переносной многоканальный измерительно-вычислительный комплекс МІС-026;
- ноутбук с операционной системой Windows 10 и программным обеспечением «Recorder»;
- тензорезисторы 2ПКБ-20-200 В ТУ 25-06-1382-78 (номинальное сопротивление = 200 Ом, фактическое = (198,20 – 198,79) Ом, коэффициент тензочувствительности = 2,10).

Стабильность характеристик тензодатчиков достигается качеством их изготовления и надежной тарировкой [4]. Поэтому была проведена тарировка измерительной системы; для тарировки используется консольная балочка равного сопротивления; при тарировке использовалось 5% тензорезисторов из одной партии; все применяемые тензорезисторы – из одной партии, в партии – 100 тензодатчиков; на упаковке с тензорезисторами присутствует заводской штамп «ОТК». Частота опроса тензорезисторов 10 Гц.

Подключение, настройка и использование комплекса МІС-026 проводится согласно его руководству по эксплуатации (Руководство по эксплуатации. Измерительный комплекс МІС-026. Мытищи: Научно-производственного предприятия «МЕРА», 2013); монтаж и подключение тензорезисторов осуществляется в соответствии с их заводской технической документацией. Схема подключения тензорезисторов – «полумост» с компенсационным датчиком. Данная схема

исключает температурное влияние нагрева элементов [4, 11].

При действии внутреннего давления в стенках цилиндров возникают нормальные напряжения по трем взаимно перпендикулярным направлениям – радиальному  $\sigma_r$ , тангенциальному  $\sigma_t$  и аксиальному  $\sigma_z$  (рис. 1) [2, 12]. Как правило, напряжения  $\sigma_t$  значительно превосходят напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_z$

[12]. В связи с чем ориентация размещения тензорезисторов на цилиндре (корпусе) гидроцилиндра вывешивания проводится в соответствии с направлением действия напряжений  $\sigma_t$  – тензорезисторы устанавливаются на наружной поверхности перпендикулярно продольной оси цилиндра гидроцилиндра 1 – 4 (рис. 1, 2).

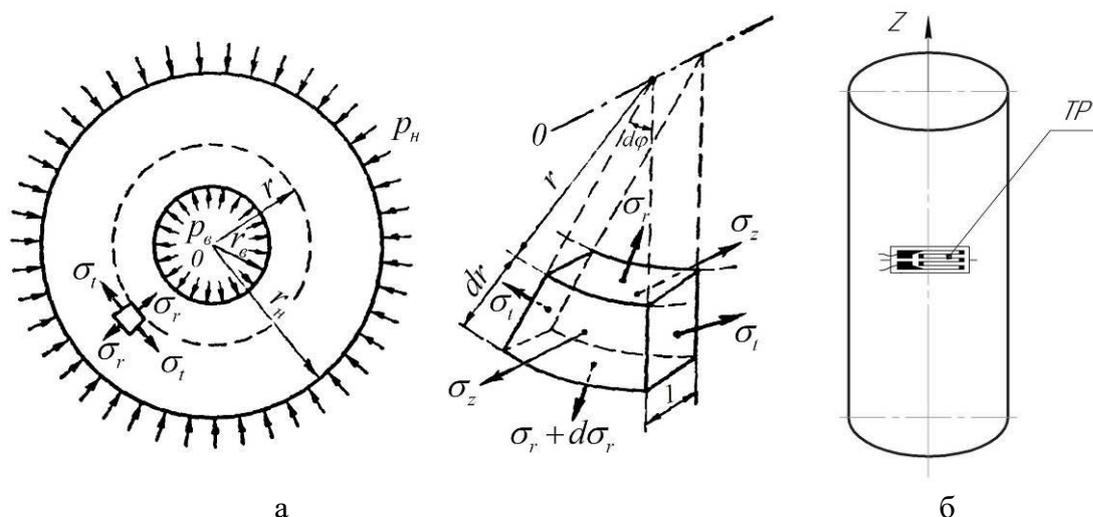


Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние цилиндра: а – расчетная схема для определения напряжений в цилиндре; б – ориентация тензорезисторов (ТР) на цилиндре

## 2.2. Проведение экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились на испытательной площадке компании ООО «ПЕТРОСЕРВИС-СДМ» (г. Санкт-Петербург, Россия) на кране стреловом автомобильном КС-45717 грузоподъемностью 25 тонн производства ОАО «Автокран» (г. Иваново, Россия). Автомобильный кран – полноповоротный с гидравлическим приводом, с жесткой подвеской телескопической трехсекционной стрелы, оснащен четырьмя выносными опорами. Гидроцилиндр вывешивания крана зафиксирован болтами на конце выносной опоры. Штоки гидроцилиндров оканчиваются сферической головкой, к которой крепится подпятник.

Заблаговременно выполнено (рис. 2):

1. Очистка поверхностей под монтаж тензорезисторов от загрязнений и лакокрасочного покрытия.

2. Механическая обработка мест установки тензорезисторов (наружная поверхность гидроцилиндров вывешивания) до необходимой степени шероховатости.

3. Нанесение разметки для наклейки тензорезисторов.

4. Обработка мест установки тензорезисторов обезжиривателем.

5. Наклейка тензорезисторов (на каждый опорный гидроцилиндр по 1 тензорезистору).

6. Визуальный контроль на отсутствие загрязнений и дефектов.

7. Проверка целостности цепи и отсутствия короткого замыкания.

8. Подключение тензорезисторов к комплексу МІС-026.

Кран располагался на открытой горизонтальной площадке. Установка-снятие крана на выносные опоры, подъем-опускание стрелы, подъем-опускание груза, вращение поворотной части крана проводится согласно руководству по эксплуатации крана. Под под-

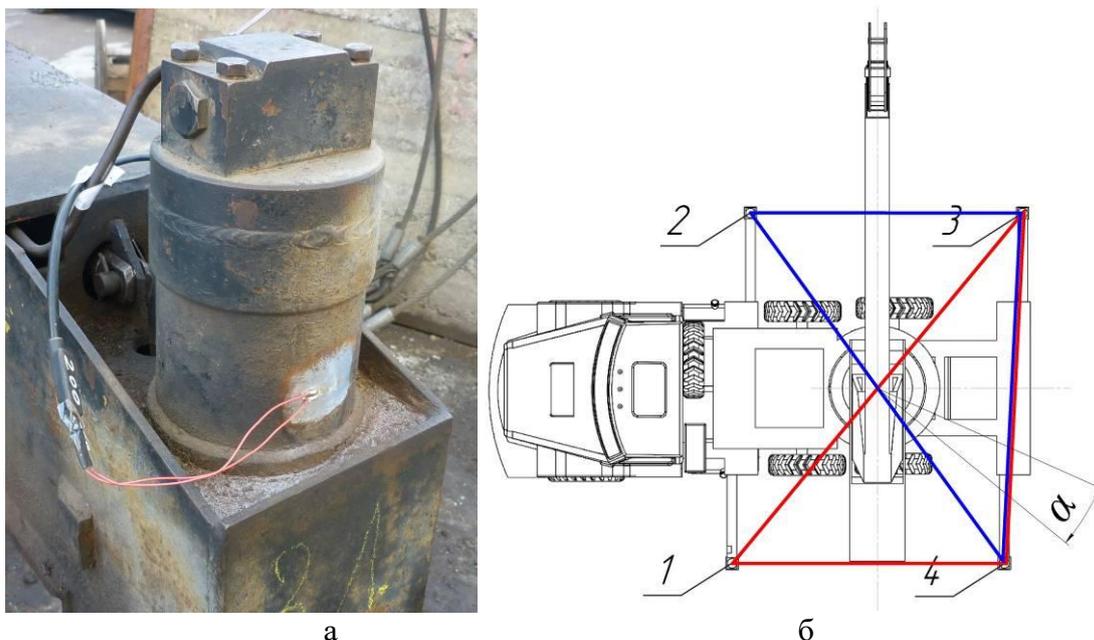


Рис. 2. Вид опорных гидроцилиндров: а – расположение тензорезистора; б – расчетная схема (1, 2, 3, 4 – опорные гидроцилиндры)

пятники деревянные подкладки не подкладывались.

Режимы нагружения грузоподъемного крана: масса контрольного груза 10 тонн, опорный контур (5,60 x 4,95) м (соответствует полностью выдвинутой выносной опоре), вылет 5 м, длина телескопической стрелы 9 м. В процессе экспериментальных испытаний проводилось вращение поворотной части крана с грузом в зоне  $\alpha$  у опоры 4 (рис. 2). Проводилась серия однотипных испытаний ( $N = 5$ ) для снижения влияния случайных погрешностей. Одно испытание соответствует двум циклам вращения поворотной части крана: «к опоре 4 – от опоры 4» (первый цикл), далее «к опоре 4 – от опоры 4» (второй цикл). Начальное и конечное положение поворотной части крана совпадает.

Нагрузки, действующие на грузоподъемный кран: весовые нагрузки (вес элементов конструкции крана, вес груза); нагрузки от сил инерции при вращательном движении и качания груза.

Выбор массы груза (10 тонн) при проведении экспериментальных исследований обоснован наличием соответствующего контрольного груза для проведения статических и динамических испытаний и соответствующих грузозахватных приспособлений для стропов-

ки груза в организации, где проводились экспериментальные исследования (рис. 3).

При проведении экспериментальных исследований все шины колес шасси автомобильного крана находились в ненагруженном состоянии, в отрыве от опорной поверхности.

В результате проведенных работ получены временные зависимости действующих напряжений наружной поверхности гидроцилиндра ( $\sigma_{m-i}$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ ). Момент установки крана на выносные опоры, подъема-опускания стрелы, подъема и опускания груза на графиках не приводится и в расчетах не рассматривается.

### 3. Результаты исследований и их анализ

Автокран КС-45717 оснащен четырьмя гидроцилиндрами вывешивания КС-45717.31.200-4 (ЦГ-125.100x580.55-02). Характеристики гидроцилиндра: диаметр поршня – 125 мм, диаметр штока – 100 мм, ход поршня – 580 мм, номинальное давление – 16 МПа.

Рабочая жидкость, находящаяся в поршневой полости гидроцилиндра вывешивания, воспринимает нагрузку от веса крана с грузом, в результате чего в этой полости образуется избыточное давление. Напряжения в



Рис. 3. Проведение эксперимента

наружной поверхности цилиндра от внутреннего давления рабочей жидкости исходя из аналитического выражения [13]:

$$\sigma_{m-i} = 2p_i \frac{d_e^2}{d_n^2 - d_e^2}, \quad (1)$$

где:  $\sigma_{m-i}$  – напряжения наружной поверхности гидроцилиндра;  $p_i$  – давление рабочей жидкости в поршневой полости гидроцилиндра;  $d_e$  – внутренний диаметр гидроцилиндра;  $d_n$  – наружный диаметр гидроцилиндра;  $i$  – номер гидроцилиндра вывешивания ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) (рис. 2).

Или

$$p_i = \frac{\sigma_{m-i} \cdot (d_n^2 - d_e^2)}{2d_e^2}, \quad (2)$$

Определив  $p_i$  (2), определяются напряжения во внутренней поверхности цилиндра от внутреннего давления рабочей жидкости:

$$\sigma_{16-i} = p_i \frac{d_n^2 + d_e^2}{d_n^2 - d_e^2}, \quad (3)$$

где:  $\sigma_{16-i}$  – напряжения внутренней поверхности гидроцилиндра.

При действии на цилиндр только внутреннего давления знаки напряжений  $\sigma_i$  во всех точках цилиндра одинаковые;  $\sigma_i$  максимальны на внутренней поверхности цилиндра [2].

Для определения полей напряжений и деформаций гидроцилиндра вывешивания в объемной (трехосной) постановке задачи в качестве функции времени применяется метод конечных элементов в нелинейном динамическом анализе расчетного модуля Simulation программы SolidWorks. Метод конечных элементов является широко распространенным методом по решению задач анализа напряженно-деформированного состояния элементов конструкции в связи с его универсальностью по отношению к геометрии исследуемой области и реологии деформирования материала [14, 15].

Функционал нелинейного динамического анализа модуля Simulation SolidWorks позволяет задавать нагрузку в виде зависимости, изменяемой по величине во времени.

Тождественность разработанной 3D-модели гидроцилиндра вывешивания (рис. 4) натурному образцу определяется корректностью линейных и угловых размеров элементов модели, расположением одних элементов относительно других, условий контактного взаимодействия элементов, свойств применяемых материалов; нерелевантные элементы, не влияющие на результаты анализа исследований, исключены. Гидроцилиндр рассматривается без уплотнений, опорно-направляющих колец, колец стопорных. Положение штока – полностью выдвинутое.

Для проведения расчета: назначается материал для всех твердых тел; определяются

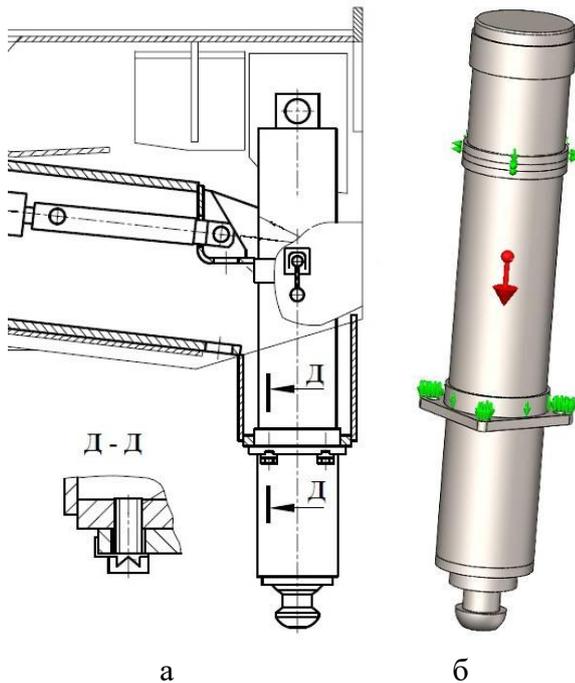


Рис. 4. Крепление гидроцилиндров:  
 а – крепление гидроцилиндра к выносной опоре согласно руководству по эксплуатации крана; б – 3D-модель гидроцилиндра вывешивания

параметры сетки конечных элементов; задаются тип взаимодействия компонентов, крепления, внешние нагрузки. Внешними нагрузками являются: сила тяжести, временные зависимости давления рабочей жидкости в поршневой полости гидроцилиндра, полученные по (2). Общее количество элементов сетки конечных элементов – 4666 шт.; процент искаженных элементов – 0.

В результате проведенных расчетов определено временное напряженно-деформированное состояние элементов гидроцилиндров вывешивания стрелового грузоподъемного крана в процессе динамического нагружения. Результат прочностного анализа представлен эпюрой напряжений, эпюрой деформаций и эпюрой перемещений гидроцилиндра вывешивания.

В качестве примера на рис. 5 представлено напряженно-деформированное состояние корпуса гидроцилиндра 4 (в продольном сечении секущей плоскостью,  $\sigma_t$ , МПа) в момент времени, когда нагрузка на опору максимальна ( $p_{4\max}$ ); полученные тензометрическим методом (рис. 2) напряжения на-

ружной поверхности гидроцилиндра в этот момент времени  $\sigma_{тн-4} = 88,03$  МПа; напряжения внутренней поверхности (определенные аналитическим методом)  $\sigma_{тв-4} = 103,24$  МПа. В соответствии с численным расчетом в этой же точке 3D-модели (точка Т, рис. 5) напряжения наружной поверхности  $\sigma_{тн-4} = 90,60$  МПа, напряжения внутренней поверхности  $\sigma_{тв-4} = 106,80$  МПа (определено инструментом «зондирование» для идентификации значений в выбранных точках). Т.е. результаты, полученные экспериментальным, аналитическим путем и методом конечных элементов, имеют хорошую сходимость.

Таким образом, в рамках численного исследования гидроцилиндра вывешивания определены параметры распределения напряжений и деформаций корпуса гидроцилиндра в функции времени в пространственной постановке задачи.

Далее определяются реакции опор:

$$R_i = S \cdot p_i = \pi \cdot \frac{d_g^2}{4} \cdot p_i, \quad (4)$$

где:  $R_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) – реакция опоры;  $S$  – площадь, на которую действует давление рабочей жидкости.

Обработка данных реакций опор при вращении поворотной части крана с грузом осуществляется согласно теории вероятности и математической статистике [11, 16], которая проводилась при помощи автоматизированного анализа для всех четырех опор в системе Mathcad [17, 18]. Полученные зависимости реакций опор  $R_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) в функции времени ( $t$ , с) представлены на рис. 6.

В соответствии с полученными данными реакций опор можно сделать вывод, что в результате вращения поворотной платформы происходило балансирование грузоподъемного крана на опорах. Изменение нагружения опор происходило, в порядке убывания значений реакции  $R_i$ , с опорного контура «4 – 3 – 2 – 1» на «4 – 3 – 1 – 2» и обратно с «4 – 3 – 1 – 2» на «4 – 3 – 2 – 1» с последовательным циклическим чередованием нагружения-разгрузки опор 1 и 2 (рис. 2, 6). Характер изменений значений реакций  $R1$  и  $R2$  может свидетельствовать о временной потере контакта с опорной площадкой (или близ-

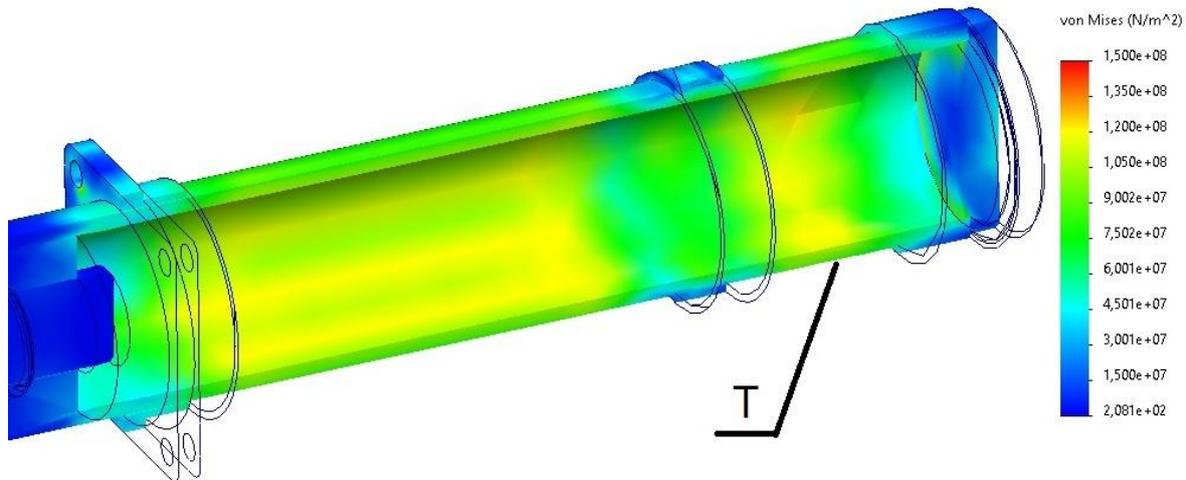


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние корпуса гидроцилиндра

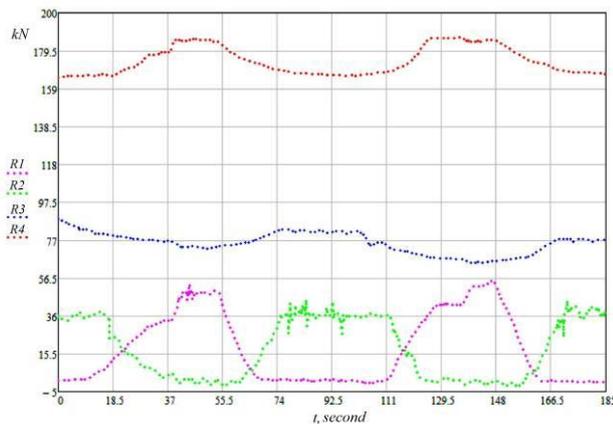


Рис. 6. Временные зависимости значений реакций опор

ком к этому состоянию) (рис. 2, 6). В связи с этим можно выдвинуть предположение о наличии (в равной степени вероятной): некоторой неровности опорной поверхности; зазоров в сочленениях выносных опор и поперечных балок рамы опорной; деформаций выносных опор, продольных и поперечных балок рамы опорной.

Базовой моделью устойчивости грузоподъемного крана считается модель, учитывающая, что для опрокидывания крана ему следует сообщить кинетическую энергию, необходимую для преодоления приращения потенциальной энергии, получаемой при повороте крана на некоторый угол, достаточный для перехода центра масс крана за ребро опрокидывания [1]. То есть, устойчивость крана обеспечивается нахождением центра масс крана внутри его опорного контура.

В связи этим наиболее информативным и простым способом контроля устойчивостью стреловых самоходных кранов является контроль текущего положения центра масс системы «грузоподъемный кран – груз» относительно ребра опрокидывания [19].

Координаты положения центра масс грузоподъемного крана с грузом являются функцией ряда одновременно действующих факторов; наиболее целесообразным является определение положения центра масс по значениям опорных реакций.

В связи с этим для настоящего эксперимента определяется текущее положение центра масс системы «грузоподъемный кран – груз», реализованная при помощи «Программы контроля и управления грузовой и собственной устойчивостью транспортного средства» [20]. Для этого, введя декартовую систему координат и назначив местоположению опорных гидроцилиндров координаты в этой системе координат в зависимости от размеров опорного контура, считая значения давления материальными точками, где сосредоточена определенная часть массы системы «грузоподъемный кран – груз», текущее положение центра масс определяется согласно выражению [3, 20]:

$$x_{\text{ЦМ}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad y_{\text{ЦМ}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (5)$$

где:  $x_{цм}$ ,  $y_{цм}$  – координаты положения центра масс системы;  $m_i$  – массы материальных точек, входящих в систему;  $x_i$ ,  $y_i$  – координаты материальных точек системы;  $n$  – количество материальных точек.

В формуле (5) вместо масс  $m_i$  используются значения давления рабочей жидкости  $p_i$  в гидроцилиндрах вывешивания или реакции опор  $R_i$ ;  $n = 4$  (соответствует количеству опор).

Собственная и грузовая устойчивость грузоподъемного крана гарантируется нахождением проекции центра масс внутри опорной базы грузоподъемного крана.

Траектория движения центра масс системы «грузоподъемный кран – груз», находящейся в динамическом режиме нагружения, в пределах опорного контура в проводимом эксперименте согласно выражению (5) в соответствии с полученными временными зависимостями значений реакций опор  $R_i$  (рис. 6) приведена на рис. 7; опора 1 имеет координаты (0, 0), опоры 2, 3, 4 – в зависимости от геометрических размеров опорного контура (5600 x 4950) мм.

На рис. 7 траектория Т1 соответствует первому циклу вращения поворотной части крана с грузом (от 0 с до 92,5 с (рис. 6)), траектория Т2 – второму циклу вращения поворотной части крана с грузом (от 92,5 с до 185 с (рис. 6)). Отклонение (колебание) траекторий Т1 и Т2 движения центра масс грузоподъемного крана в пределах опорного контура может объясняться влиянием инерционных сил раскачивания контрольного груза (рис. 7). При анализе временных зависимостей экспериментальных значений реакций опор  $R_i$  (рис. 6) было отмечено, что скорость изменения реакции опоры 1 («увеличение – уменьшение – увеличение – уменьшение») неоднородная: увеличение приблизительно в 1,7...2,4 раза происходит дольше, чем уменьшение (предположительно связано с особенностями работы оператора). Что объясняет отклонение траекторий Т1 и Т2 движения центра масс грузоподъемного крана – при большей скорости вращения поворотной части крана положение центра масс системы ближе к ребрам опрокидывания, чем при меньшей скорости вращения (рис. 7).

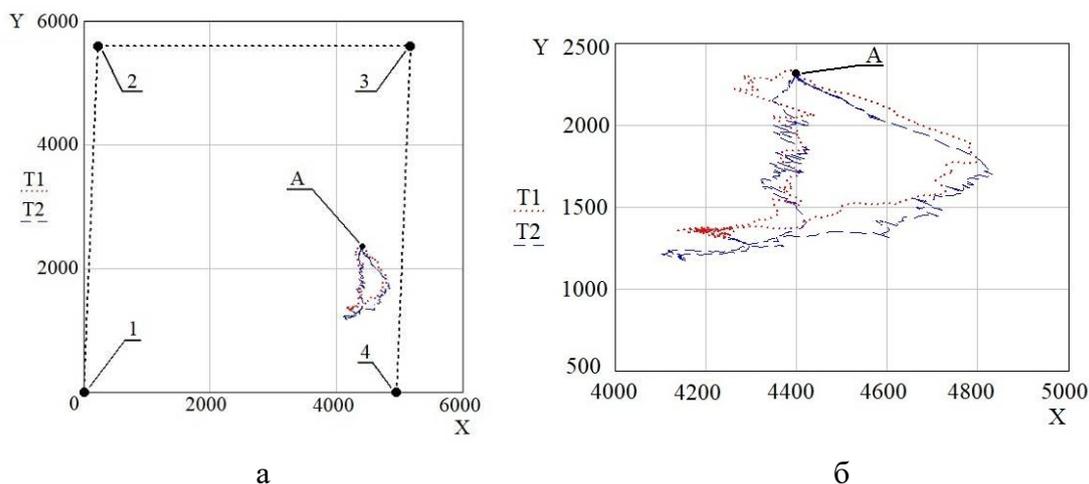


Рис. 7. Перемещение центра масс грузоподъемного крана: а – траектория движения центра масс крана в пределах опорного контура; б – укрупненный вид с траекторий движения центра масс (А – начальное и конечное положение; 1, 2, 3, 4 – опорные гидроцилиндры)

Полученные положительные результаты экспериментальных исследований подтверждают концепцию контроля устойчивостью грузоподъемного крана, находящегося в динамическом режиме нагружения, на основе

определения текущего положения центра масс системы «грузоподъемный кран – груз».

#### 4. Заключение

В результате проведенных экспериментальных опытных работ по анализу динамического нагружения стрелового самоходного крана, используя тензометрический метод исследования, получены зависимости реакций опор в функции времени, действующие напряжения наружной и внутренней поверхности гидроцилиндров вывешивания в процессе вращения поворотной части крана с грузом. В результате проведенного анализа сделан вывод, что при вращении поворотной платформы с рабочим оборудованием в проводимом эксперименте происходила трансформация нагружения опорного контура грузоподъемного крана – последовательное циклическое нагружение и разгрузка опор крана.

#### Список литературы

1. Вайнсон А.А. Подъемно-транспортные машины. М.: Машиностроение, 1989. 536 с.
2. Дарков А.В., Шапиро Г.С. Сопrotivление материалов. М.: Высшая школа, 1975. 654 с.
3. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов, т. 1. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. 432 с.
4. Гохберг М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. Л.: Машиностроение, 1969. 520 с.
5. Обыденков 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. Вып. 3. С. 30-36.
6. Cekus D., Depta F., Kubanek M., Kuczynski Ł., Kwiaton P. Event Visualization and Trajectory Tracking of the Load Carried by Rotary Crane // Sensors, 2022, No. 22, p. 480. DOI: 10.3390/s22020480
7. Jeng S.-L., Yang C.-F., Chieng W.-H. Outrigger force measure for mobile crane safety based on linear programming optimization // Mechanics Based Design of Structures and Ma-

Важным моментом экспериментальных исследований является то, что исследования были проведены на реальном объекте (грузоподъемном кране).

В рамках исследования гидроцилиндра вывешивания определены параметры напряженно-деформируемого состояния цилиндра (корпуса) гидроцилиндра в функции времени.

По полученным временным зависимостям значений реакций опор в проводимом эксперименте определена траектория движения центра масс системы «грузоподъемный кран – груз».

Положительные результаты подтверждают концепцию контроля устойчивостью грузоподъемного крана, находящегося в динамическом режиме нагружения, на основе определение текущего положения центра масс системы «грузоподъемный кран – груз».

#### References

1. Vaynson A.A. *Podemno-transportnye mashiny* [Lifting-transport machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 536 p. (In Russian)
2. Darkov A.V., Shapiro G.S. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Vysshaya shkola, 1975. 654 p. (In Russian)
3. Piskunov N.S. *Differencialnoe i integralnoe ischisleniya dlya vtuzov, m.1* [Differential and integral calculus for technical universities, Vol. 1]. Moscow, Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1985. 432 p. (In Russian)
4. Gokhberg. M.M. *Metallicheskiye konstruktsii podyemno-transportnykh mashin* [Metal structures of hoisting machines]. Leningrad, Mashinostroenie, 1969. 520 p. (In Russian)
5. Obydenov V.A., Antsev V.Yu., Sorokin P.A., Mishin A.V. Study of stability of mobile lifting machines by finite element method. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*, 2011, No. 3, pp. 30-36. (In Russian)
6. Cekus D., Depta F., Kubanek M., Kuczynski Ł., Kwiaton P. Event Visualization and Trajectory Tracking of the Load Carried by Rotary Crane. *Sensors*, 2022, Vol. 22, p. 480.

- chines, 2010, Vol.38, No.2, pp. 145-170. DOI: 10.1080/15397730903482702
8. Romanello G. Stability analysis of mobile cranes and determination of outriggers loading // *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2018, Vol. 16 No. 6, pp. 938-958. DOI:10.1108/JEDT-05-2018-0084
9. Trąbka A. The influence of clearances in a drive system on dynamics and kinematics of a telescopic crane // *Acta Mechanica et Automatica*, 2015, Vol. 9, No. 1, pp. 9-13. DOI:10.1515/ama-2015-0002
10. Корытов М.С., Безродина А.Е. Сравнительная оценка энергетических затрат при перемещениях кранов-штабелеров // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2024. №1. С. 37-45. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-01-37-45
11. Исакович Р.Я. Технологические измерения и приборы. М.: Недра, 1979. 344 с.
12. Мелик-Гайказов В.И., Подгорный Ю.П., Самусенко М.Ф., Фалалеев П.П. Гидропривод тяжелых грузоподъемных машин и самоходных агрегатов. М.: Машиностроение, 1968. 264 с.
13. Ковалевский В.Ф., Железняков Н.Б., Битлин Ю.Е. Справочник по гидроприводам горных машин. М.: Недра, 1973. 504 с.
14. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. СПб.: Политехника, 1993. 391 с.
15. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. М.: ДМК Пресс, 2015. 562 с.
16. Деденко Л.Г., Керженцев В.В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента. М.: МГУ, 1977. 112 с.
17. Benker H. Practical Use of Mathcad®: Solving Mathematical Problems with a Computer Algebra System. Springer, 1999. 505 p.
18. Maxfield B. Engineering with Mathcad: Using Mathcad to Create and Organize your Engineering Calculations. Elsevier, 2006. 520 p.
19. Ватулин Я.С. Автоматизированный комплекс управления устойчивостью мобильных грузоподъемных средств // *Подъемно-транспортные машины*: Известия DOI: 10.3390/s22020480
7. Jeng S.-L., Yang C.-F., Chieng W.-H. Outrigger force measure for mobile crane safety based on linear programming optimization. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2010, Vol. 38. No. 2, pp. 145-170. DOI: 10.1080/15397730903482702
8. Romanello G. Stability analysis of mobile cranes and determination of outriggers loading. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2018, Vol. 16, No. 6, pp. 938-958. DOI:10.1108/JEDT-05-2018-0084
9. Trąbka A. The influence of clearances in a drive system on dynamics and kinematics of a telescopic crane. *Acta Mechanica et Automatica*, 2015, Vol. 9, No. 1, pp. 9-13. DOI:10.1515/ama-2015-0002
10. Korytov M.S., Bezrodina A.E. Comparative assessment of energy costs during the movements of stacker cranes. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2024, No. 1, pp. 37-45. DOI: 10.22281/2413-9920-2024-10-01-37-45. (In Russian)
11. Isakovich R.Ya. *Tekhnologicheskie izmereniya i pribory* [Technological measurements and devices]. Moscow, Nedra, 1979. 344 p. (In Russian)
12. Melik-Gaikazov V.I., Podgorny Yu.P., Samusenko M.F., Falaleev P.P. *Gidroprivod tyazhelykh gruzopodemnykh mashin i samohodnykh agregatov* [Hydraulic drive of heavy lifting machines and self-propelled units]. Moscow, Mashinostroenie, 1968. 264 p. (In Russian)
13. Kovalevsky V.F., Zheleznyakov N.B., Bitlin Yu.E. *Spravochnik po gidroprivodam gornykh mashin* [Handbook of hydraulic drives of mining machines]. Moscow, Nedra, 1973. 504 p. (In Russian)
14. Karzov G.P., Margolin B.Z., Shvetsova V.A. *Fiziko-mekhanicheskoe modelirovanie prtscessov razrusheniya* [Physical and mechanical modeling of destruction processes]. St. Petersburg, Politekhnik, 1993. 391 p. (In Russian)
15. Alyamovsky A.A. *SolidWorks Simulation. Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii* [SolidWorks Simulation. Engineering analysis for profes-

Тулского государственного университета. 2001. С. 146-152.

20. Программа контроля и управления грузовой и собственной устойчивостью транспортного средства / Я.С. Ватулин, Е.Я. Ватулина, Б.О. Поляков, Д.А. Потахов, Е.А. Потахов. – Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018616841. Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 07.06.2018.

† sionals: tasks, methods, recommendations].  
† Moscow, DMK Press, 2015. 562 p. (In Russian)

† 16. Dedenko L.G., Kerzhentsev V.V.  
† *Matematicheskaya obrabotka i oformlenie*  
† *rezultatov eksperimenta* [Mathematical pro-  
† cessing and presentation of experimental re-  
† sults]. Moscow, MGU, 1977. 112 p. (In Rus-  
† sian)

† 17. Benker H. Practical Use of Mathcad®:  
† Solving Mathematical Problems with a Com-  
† puter Algebra System. Springer, 1999. 505 p.

† 18. Maxfield B. Engineering with Mathcad:  
† Using Mathcad to Create and Organize your  
† Engineering Calculations. Elsevier, 2006. 520 p.

† 19. Vatulin Ya.S. Automated control com-  
† plex for stability of mobile lifting equipment.  
† *Podemno-transportnye mashiny: Izv. Tul'skogo*  
† *gosudarstvennogo universiteta*, 2001, pp. 146-  
† 152. (In Russian)

† 20. Vatulin Ya.S., Vatulina E.Ya.,  
† Polyakov B.O., Potakhov D.A., Potakhov E.A.  
† *Programma kontrolya i upravleniya gruzovoy i*  
† *sobstvennoy ustoychivostyu transportnogo*  
† *sredstva. Svidetelstvo o gosudarstvennoy*  
† *registratsii programmy dlya EVM* [Program  
† for monitoring and control of cargo and vehi-  
† cle stability]. No. 2018616841, 2018. (In Rus-  
† sian)