УДК 621.873.2/.3

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ МЕСТНОЙ И ОБЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ СТРЕЛЫ ГРУЗОПОДЪЕМНОГО КРАНА

*Е.А. Потахов

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

аннотация

Введение. В настоящей статье исследуется общая и местная устойчивость телескопической стрелы (TC).

Методы. Применяются методы аналитического исследования колебательных систем с конечным числом степеней свободы; методы раздела механики деформируемого твердого тела – сопротивления материалов; среда Solid Edge Simulation – программа анализа методом конечных элементов, основанная на технологии анализа FEA Femap и решателе NX Nastran.

Результаты. В результате исследований была разработана методика контроля общей и местной устойчивости TC. Использование расчета на общую устойчивость TC позволяет определять грузовысотные характеристики, параметры рабочего оборудования, обеспечивающие устойчивое состояние системы, и отслеживать общее устойчивое состояние TC в функции характеристик TC. Применение расчета на местную устойчивость позволяет отслеживать максимальное напряженное состояние TC, являющееся критерием местной устойчивости, что предоставляет возможность контроля устойчивости наиболее нагруженных полок и стенок. Предлагаемая методика расчета напряженного состояния впервые учитывает совместное действие внешних и местных горизонтальных и вертикальных нагрузок.

Заключение. Применение методики контроля общей и местной устойчивости TC позволяет при проектировании автоматизировано устанавливать наиболее оптимальные характеристики рабочего оборудования, включать разработанную методику в систему безопасности крана, повышать уровень безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов, оснащенных TC.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: телескопическая стрела, местная устойчивость, эквивалентные напряжения, опорные элементы, боковые упоры.

© Е.А. Потахов



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

110

CONTROL TECHNIQUE OF LOCAL AND GENERAL STABILITY OF THE LOADING CRANE'S TELESCOPIC BOOM

***E.A. Potakhov** Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia *epotakhov@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The paper examines the overall and local stability of a telescopic boom (TS). *Materials and methods.* The author uses methods for analytical research of oscillatory systems with a finite number of degrees and methods of the Deformable Solid Mechanics, such as Material Resistance. Moreover, the author applies Solid Edge Simulation as finite element analysis program based on FEA Femap analysis technology and the NX Nastran solver.

Results. As a result, the author develops a methodology for monitoring the overall and local stability of the vehicle. The usage of the calculation for the overall stability of the vehicle allows to determine the load-height characteristics, parameters of the working equipment that ensure the steady state of the system, and also to track the overall steady state of the vehicle as a function of the vehicle characteristics. In addition, the usage of local stability calculation allows to track the maximum stress state of the vehicle, which is a criterion of local stability and provides the ability to monitor the stability of the most loaded shelves and walls. The proposed method for calculating the stress state takes into account the combined effect of external and local horizontal and vertical loads.

Discussion and conclusions. The usage of methods of monitoring the overall and local stability of the vehicle allows to set automatically the most optimal characteristics of the working equipment, including the developed method in the crane safety system, and to increase the level of safe operation of load-lifting cranes equipped with vehicles.

KEYWORDS: telescopic boom, local stability, equivalent stresses, support elements, side stop.

© E.A. Potakhov



Content is available under the license Creative Commons Attribution 4.0 License.

введение

В настоящее время самоходные грузоподъемные краны стрелового типа, оснащенные телескопическим стреловым оборудованием, находят широкое применение при выполнении погрузочно-разгрузочных, перегрузочных, транспортных, монтажно-сборочных и складских работ¹. Это обусловлено рядом достоинств применения телескопической стрелы (TC): возможностью работы в стесненных условиях, получением различной длины стрелы в диапазоне разности максимальной и минимальной длин, коротким временем позиционирования, что значительно повышает производительность грузоподъемных машин.

В то же время стреловые самоходные краны (ССК) являются объектами повышенной производственной опасности и их эксплуатация связана с вероятностью возникновения аварийных ситуаций с негативными технико-экономическими и социальными последствиями. К основным причинам, приводящим кран к авариям и несчастным случаям, можно отнести ненормированное нагружение ТС [1]. В связи с тем, что TC является одним из наиболее дорогостоящих элементов стрелового крана [2], актуальность исследования критических режимов нагружения стрелового оборудования обуславливается не только критериями безопасной эксплуатации грузоподъемной машины, но и экономическими факторами.

Критическим состоянием механической системы является выход системы из устойчивого состояния равновесия². Нарушение равновесного состояния TC может быть вызвано:

1. Потерей общей устойчивости ТС.

2. Потерей местной устойчивости стенок и полок.

Потеря общей устойчивости TC может произойти, например, в результате деформации гидроцилиндра подъёма. Тема нагружения гидроцилиндра широко изучена. Также потеря общей устойчивости ТС может быть обусловлена значительной опрокидывающей нагрузкой со стороны груза и неверным соотношением характеристик ТС (масса, длина, вылет, жесткость секций; моменты инерций секции и сечений ТС) при определенном вылете. Данная проблема тесно связана с устойчивостью крана, которой было посвящено множество исследований³ [3, 4, 5]. Однако все существующие работы учитывают ограниченное количество характеристик ТС, в результате чего не представляется возможным установить наиболее оптимальные значения масс, длин, вылетов, жесткости, моментов инерций, количества и других секций стрелового оборудования.

Местная устойчивость TC определяется напряженно-деформированным состоянием наиболее нагруженных участков TC⁴. Данная тема была изучена в ряде работ^{5, 6} [6, 7, 8, 9, 10], но во всех существующих исследованиях рассматривается напряженность полок и стенок TC, которая вызвана действием только вертикальных нагрузок в статическом режиме.

Задачей исследования является разработка методики определения предельного состояния ТС при проектировании и в режиме реального времени при эксплуатации крана в функции характеристик стрелового оборудования и наибольшей нагруженности его элементов, обусловленной нагрузками в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Пути реализации предложенного способа никогда не предлагались.

Необходимость определения критического состояния ТС существует при двух обстоятельствах: на стадии проектирования и при эксплуатации крана.

С целью идентификации (установления и предотвращения) критического состояния ТС была разработана методика контроля общей и местной устойчивости ТС (рисунок 1), использование которой при помощи ЭВМ позво-

⁴ Ряхин В.А., Мошкарев Г.И. Долговечность и устойчивость сварных конструкций строительных и дорожных машин. М. : Машиностроение, 1984. 232 с.

⁵Там же.

⁶ Гохберг М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Машиностроение, 1969. 520 с.

¹Александров М.П. Грузоподъемные машины : учебник для вузов. М. : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана : Высшая школа, 2000. 552 с.

²Пановко Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Изд. 3-е, доп. и переработ. Л. : Машиностроение, 1976. 320 с.

³ Панкратов С.А., Ряхин В.А. Основы расчета и проектирования металлоконструкций строительно-дорожных машин. М. : Машиностроение, 1967. 344 с.



Рисунок 1 – Схема методики контроля общей и местной устойчивости ТС

Figure 1 – Scheme of the control technique of CU general and local stability

лит автоматизировано устанавливать наиболее рациональные характеристики рабочего оборудования при проектировании, а также при включении в систему безопасности крана повысить уровень безопасной эксплуатации ССК, оборудованных TC.

Методика контроля общей и местной устойчивости TC заключается в следующем. На первом этапе посредством введения входных параметров формируются матрицы жесткости, инерции и диссипации системы, учитывающие характеристики TC [масса, жесткости, длины, вылеты, моменты инерций секций и гидроцилиндров телескопирования (ГЦТ); масса груза и ГЦТ; жесткости каната и ГЦТ]. Далее следуют два варианта расчета: на местную и общую устойчивость.

РАСЧЕТ НА ОБЩУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ТС

При отсутствии возмущающего воздействия (инерционные нагрузки TC и груза в периоды неустановившегося движения; нагрузки, обусловленные просадкой и внезапным снятием нагрузки) на основе первого блока составляется и затем решается система линейных однородных дифференциальных уравнений, описывающая свободные колебания динамической модели в вертикальной и горизонтальной плоскостях (блок 2).

Корнями определителя системы являются комплексные и попарно сопряженные величины вида

$$\lambda_i = -n_i \pm i k_i , \qquad (1)$$

где n_i – коэффициенты демпфирования; k_i – собственные частоты демпфированной системы, которые определяются: $k = \sqrt{k_0^2 - n^2}$, k₀ – собственная частота соответствующей консервативной системы^{7,8} [3,15].

При n<0 система неустойчива в связи с возрастающим характером графика изменения обобщенных координат (см. рисунок 1, блок 4.1.1.1). В условиях существования сил

⁷ Пановко Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. 320 с.

⁸Челомей В. Н. Вибрации в технике: справочник : в 6 т. / ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). М. : Машиностроение, 1978, Т. 1. Колебания линейных систем / под ред. В. В. Болотина. 352 с.

тяжести и сопротивлений и отсутствия возмущающего воздействия периодическое незатухающее движение (при *n*=0) невозможно, поэтому такое решение уравнения указывает на неверное соотношение вводимых входных параметров (см. рисунок 1, блок 4.1.1.2).

Корни вида $n \ge k$ (k_0) характеризуют монотонное затухающее движение и устойчивость состояния равновесия механической системы (см. рисунок 1, блок 4.1.2.1). Коэффициент демпфирования в диапазоне: 0<n<k (k_0) соответствует состоянию устойчивости системы и совершению ею собственных затухающих колебаний (см. рисунок 1, блок 4.1.2.2).

Данная методика применима только к системе, движение которой характеризуется свободными колебаниями. В связи с этим при контроле устойчивости по коэффициентам демпфирования TC, испытывающей возмущающее воздействие, вынужденное движение системы с допущением сводится к свободному: например, нагрузка переводится в дополнительную массу груза или секции. Реализация данной операции при включении предлагаемой методики в систему безопасности ССК может заключаться в переводе микроконтроллером значений датчика нагрузки.

РАСЧЕТ НА МЕСТНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ТС

ТС представляет собой консольную конструкцию переменного сечения, состоящую из сопрягаемых между собой тонкостенных неподвижной (корневой) и нескольких подвижных секций, имеющих в поперечном сечении замкнутый контур и каждая последующая из которых входит внутрь предыдущей. Каждая из подвижных секций опирается на опорные элементы, установленные в нижней передней части основания, а сзади – на опорные элементы, установленные в своей верхней части. От бокового смещения секции удерживаются боковыми упорами. Опорные элементы и боковые упоры располагаются в одних сечениях TC.

В качестве механизма выдвижения и втягивания секций наиболее часто используется гидроцилиндр телескопирования (ГЦТ), который, обладая собственной изгибной жесткостью и некоторой массой, оказывает значительное влияние на колебательный процесс и нагружение стрелового оборудования.

При нагружении в вертикальной плоскости можно выделить три расчетных положения ТС (рисунок 2): 1-е расчетное положение – нормированное нагружение стрелового оборудования, при котором на ТС действует вес груза, нагружаются опорные элементы; 2-е и 3-е расчетные положения образуются в результате действия инерционной нагрузки от внезапного снятия веса груза. 2-е расчетное положение характеризуется опиранием на цапфы ГЦТ без контактирования секций при забросе ТС вверх. При 3-м расчетном положении заброс секций сопровождается ударными взаимодействиями внешней и внутренней секций в точках А, В, С, D и более значительной по величине инерционной силой.

Нагружение TC в горизонтальной плоскости также можно подразделить на три аналогичные с горизонтальными расчетными положениями (рисунок 3), отличающимися отсутствием действия силы тяжести и опоры корневой секции, обусловленной ГЦ подъема, а также местом приложения местных нагрузок: секции опираются на боковые упоры, опорные нагрузки воздействуют на стенки TC.

Внешними нагрузками при повороте TC являются касательная и центробежная силы инерции. Влияние центробежной силы находится по известным методикам действия осевой нагрузки на стержень⁹. При режиме нагружения TC в 1-м горизонтальном положении нулевое значение принимают реакции R^{Π}_{II} , R^{Π}_{III} , R^{Π}_{II

При 2-м 3-м горизонтальном И и вертикальном расчетных положениях на каждую ниж-нюю секцию TC, помимо возмущающих сил от опорных элементов и ударных взаимодействий CO стороны соответствующей верхней секции, действуют инерционные силы $F_{_{\rm UH01}}$, $F_{_{\rm UH02}}$, $F_{_{\rm UH11}}$, $F_{_{\rm UH11}}$, равные по величине и противоположные по направлению соответствующим возмущающим силам при 1-м расчетном положении (например, для 2-го вертикального положения $F_{\mu H 01} = F_{\mu}; F_{\mu H 02} = F_{\mu}; F_{\mu H 11} = F_{\mu};$ $F_{\mu\mu11} = F_{\mu\nu}$).

114

⁹ Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов. 2-е изд., перераб. и доп. Киев : Наук. думка, 1988. 736 с.



Рисунок 2 – Расчетные схемы нагружения ТС в плоскости подвеса груза: а – 1-е расчетное положение; б – 2-е расчетное положение; в – 3-е расчетное положение

Figure 2 – Calculation schemes of the CU loading in the freight suspension plane: a – 1st settlement situation; b – 2nd settlement situation; c – 3rd settlement situation



Рисунок 3 – Расчетная схема статического нагружения ТС в горизонтальной плоскости (1-е горизонтальное расчетное положение): Iⁿ – IVⁿ – левые боковые упоры; Iⁿ – IVⁿ – правые боковые упоры; Rⁿ_I-Rⁿ_{IV} – реакции левых боковых упоров; Rⁿ_I-Rⁿ_{IV} – реакции правых боковых упоров

Figure 3 – Calculation scheme of the CU static loading in the horizontal plane (1st horizontal settlement position): IL – IVL – left side emphasis; IP – IVP – right side emphasis; RLI-RLIV – reactions of the left side emphasis; RPI-RPIV – reactions of the right side emphasis

На первом этапе метода расчета местной устойчивости TC (см. рисунок 1, блок 5.1) полученные в результате решения дифференциальных уравнений и описывающие вынужденные и свободные колебания динамической модели (при проектировании) или считанные датчиком с оголовка TC (при эксплуатации ССК) перемещения разбиваются на три этапа, соответствующие трём расчетным положениям ТС (рисунок 4). Наступление 3-го расчетного положения определяется условием *у* ≥ *y*_д, где *y*_д – расстояние между секциями, при преодолении которого произойдет ударное взаимодействие между элементами TC.



Рисунок 4 — Колебательный процесс в вертикальной плоскости в соответствии с расчетными положениями TC: 1 — первое расчетное положение; 2 — второе расчетное положение; 3 — третье расчетное положение

Figure 4 – Oscillatory process in the vertical plane according to CU settlement provisions: 1 – 1st settlement situation; 2 – 2nd settlement situation; 3 – 3rd settlement situation Затем находится возмущающая нагрузка в функции перемещений – блок 5.2. Для определения зависимости возмущающей нагрузки от перемещений секций можно выразить возмущающую силу из уравнения прогиба, составленного для каждой секции TC при использовании метода начальных параметров. Метод начальных параметров является способом расчета угловых и линейных перемещений сечений, испытывающих изгиб прямых балок, при котором искомые величины определяются при помощи универсального уравнения упругой линии и начальных параметров (угол наклона и прогиб в начале координат расчетной схемы), являющихся постоянными интегрирования и определяемых из условий закрепления балки. Выбор данного метода обусловлен относительной простотой способа и возможностью учета любого количества силовых участков². С целью обеспечения точности расчета система должна учитывать влияние пространственного отклонения элементов TC, обусловленного межсекционными зазорами, остаточной деформацией (изгибом) секций и начальным искривлением секций (например, при расчете в статическом нагружении вычитать от действительного (текущего) прогиба данное отклонение; при динамическом нагружении вводить коэффициент динамичности).

На следующем этапе для каждого расчетного положения определяется максимальное напряжение полок и стенок наиболее нагруженных сечений ТС в функции возмущающей нагрузки (блок 5.3).

Максимальная нагруженность TC образуется в сечениях давления опорных элементов, где происходит суммирование деформаций от внешних нагрузок и сил, действующих со стороны опорных элементов (местных нагрузок), а также проявляется стеснение депланацией. При этом напряжения, вызванные давлением опорных элементов, могут в несколько раз превышать напряжения от внешних нагрузок¹⁰. Максимальные напряжения образуются в полке, в местах под опорными элементами, и в зонах, расположенных в сечении опорных элементов, в непосредственной близости к кромке соединения стойки и пояса¹¹. При этом наибольшие контактные давления образуются только на узких краях опорных элементов, а не распределяются равномерно по всей поверхности опорных элементов [6].

Эквивалентные напряжения в любой точке полки и стенки (наиболее важны в краевой области приложения опорных усилий (зоны пояса) и в областях, расположенных в сечении опорных элементов и прилегающих к ребру соединения стенки с полкой) от действия усилий опорных элементов и внешних вертикальных нагрузок:

$$\sigma_{\Im i} = \sqrt{(\sigma^{BH}_{X} + \sigma_{XM})^{2} + \sigma^{2}_{YM} - (\sigma^{BH}_{X} + \sigma_{XM}) \cdot \sigma_{YM} + \Im \cdot (\tau_{\kappa} + \tau_{M} + \tau_{cq})}, \qquad (2)$$

где $\sigma_{x^{BH}}$ – продольные нормальные напряжения от внешней нагрузки с учетом мембранных напряжений (σ_{MEM}); σ_{XM} – продольные напряжения от местных нагрузок; σ_{YM} – поперечные напряжения от местных нагрузок; τ_{κ} , τ_{cq} – касательные напряжения от местных нагрузок; τ_{κ} , τ_{cq} – касательные напряжения от местных нагрузок; τ_{R} , τ_{cq} – касательные напряжения от местных вызванные внешними нагрузками¹² [10].

Принимаем

$$\sigma^{BH}_{X} = \sigma^{BH} + \sigma_{MEM}; \quad \sigma^{BH} = \frac{M_i}{W_i}; \quad \sigma_{YM} = \pm \frac{6M_{YM}}{\delta^2_{\Pi(C)}}; \quad \sigma_{XM} = \pm \frac{6M_{XM}}{\delta^2_{\Pi(C)}}; \quad \tau_{cq} = \frac{Q_i \cdot S_{xi}}{J_{xi} \cdot b_{yi}}; \quad \tau_{\kappa} = \frac{M_{\kappa p}}{W_i}; \quad \tau_{M} = \frac{6M_{\kappa p}}{\delta^2_{\Pi(C)}}, \quad (3)$$

где M_i – изгибающие моменты от внешних нагрузок; M_{KP} – крутящий момент; M_{iM} – изгибающие моменты от местных нагрузок относительно полки (стенки);. $\delta_{\Pi(C)}$ – толщина полки (стенки); W_i – осевой момент сопротивления площади поперечного сечения; Q_i – поперечные силы от внешних нагрузок; J_{xi} – осевой момент инерции сечения; b_{yi} – ширина сечения в рассматриваемом слое материала; S_{xi} – статический момент относительно нейтральной линии, той части сечения, расположенной между уровнем рассматриваемой точки и краем сечения (рисунок 5, а).

¹⁰ Ряхин В.А., Мошкарев Г.И. Долговечность и устойчивость сварных конструкций строительных и дорожных машин. 232 с.

¹¹ Там же.

¹² Там же.

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ



Рисунок 5 – Схема приложения местных нагрузок от опорных элементов и боковых упоров на верхнюю секцию при 1-м положении: а – от вертикальных нагрузок; б – от горизонтальных нагрузок;

в – пространственное представление давления нагрузок; Р₃ – нагрузки в сечении III; Р₄ – нагрузки в сечении IV

Figure 5 – Application scheme of local loadings from basic elements and side emphasis on the top section at the 1st situation: a – from vertical loadings; b – from horizontal loadings; c – spatial representation of the loadings' pressure; P₂– loadings in the III section; P4– loadings in the IV section

Изгибающие моменты и поперечные силы от внешних нагрузок определяются согласно известным методам сопротивления материалов (рисунок 6).



Рисунок 6 – Эпюры изгибающих моментов и поперечной силы при 1-м вертикальном расчетном положении

Figure 6 – Diagram of the bending moments and cross force at the 1st vertical settlement position

В связи со схожестью конструктивного исполнения и взаимодействия элементов TC в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также прочностного анализа конструкции в модуле проведения расчетов методом конечных элементов Solid Edge Simulation (рисунок 7,б) можно сделать вывод, что максимальная нагруженность TC, вызванная горизонтальными силами, образуется в



Рисунок 7 – Нагруженность элемента ТС в результате действия местных сил: а – вертикальные силы; б – горизонтальные силы; в – совместное действие вертикальных и горизонтальных сил

Figure 7 – Loading of the CU element in the result of local forces action: a - vertical forces; b - horizontal forces; c - joint action of vertical and horizontal forces

сечениях давления боковых упоров, где происходит суммирование деформаций от горизонтальных внешних нагрузок и местных сил, действующих со стороны боковых упоров; при этом максимальные напряжения образуются в стенке, в местах под боковыми упорами, и в областях, расположенных в сечении боковых упоров, в непосредственной близости к кромке соединения стойки и пояса.

Эквивалентные напряжения в любой точке полки и стенки [наиболее важно: в области приложения опорных усилий (зоны стойки) и в зонах, расположенных в сечении опорных элементов и прилегающих к ребру соединения стенки с полкой] от действия усилий боковых упоров и внешних горизонтальных нагрузок предлагается определять по формуле (2), но при замене вертикальных нагрузок на горизонтальные.

В связи с тем что при повороте крановой платформы на TC одновременно действуют внешние нагрузки в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также усилия опорных элементов и усилия боковых упоров, существует необходимость определения совместного влияния на нагруженность секций внешних и местных вертикальных и горизонтальных нагрузок.

В результате ряда расчетов методом конечных элементов напряженного состояния TC (см. рисунок 7) была установлена следующая зависимость для определения максимальных суммарных эквивалентных напряжений полок и стенок TC (имеющей прямоугольный (коробчатый) профиль) от совместного действия внешних горизонтальных и вертикальных на-

грузок, а также местных нагрузок от опорных элементов и боковых упоров:

$$\sigma^{j}_{\max} \approx \sqrt{\left[\sigma^{j}_{\max, cop}\right]^{2} + \left[\sigma^{j}_{\max, sepm}\right]^{2}}$$
, (4)

где σ_{rop}^{i} – напряжения, обусловленные горизонтальными внешними и местными усилиями; $\sigma_{верт}^{i}$ – напряжения, обусловленные вертикальными внешними и местными усилиями; σ_{max}^{j} – максимальные напряжения в области: σ_{max}^{O3} – действия опорных элементов (полка), σ_{max}^{F} – действия боковых упоров (стенка), σ_{max}^{F} – ребра соединения полки со стенкой, расположенного между действием усилий опорных элементов и боковых упоров.

Потеря местной устойчивости стенок и полок происходит вследствие развития пластических деформаций, образующихся при достижении напряжений предела текучести, и в результате потери устойчивого равновесия участков на стадии упругой деформации [7]. В связи с этим с целью проверки полок и стенок на развитие пластических деформаций высчитанные максимальные напряжения полок и стенок TC сравниваются с пределом текучести (см. рисунок 1, блок 5.4).

Далее осуществляется проверка полок и стенок на местную устойчивость на стадии упругой деформации (см. рисунок 1, блок 5.4.1). Для определения устойчивости полок и стенок TC используется известная методика^{13,} ¹⁴, применяемая относительно напряжений ребра соединения полки и стенки, области действий опорных элементов и боковых упоров:

¹³ Там же.

¹⁴ Гохберг М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. 520 с.

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma^{BH}}{\sigma_{\kappa p}} + \frac{\sigma_{M}}{\sigma_{\kappa p,M}}\right)^{2} + \left(\frac{\tau_{\max}}{\tau_{\kappa p}}\right)^{2}} = \Omega^{j} \leq \gamma, \quad (5)$$

где $\sigma^{\rm BH}$ – максимальные нормальные напряжения от изгиба и сжатия от действия внешних нагрузок ($\sigma^{\rm BH} = \sqrt{\sigma^2}_{BH-cop} + \sigma^2_{BH-eepm}$); σ_M – напряжения от местных усилий, $\sigma_M = \sqrt{\sigma^2}_{M-cop} + \sigma^2_{M-eepm}$; $\tau_{\rm max}$ – максимальные касательные напряжения, $\tau_{\rm max} = \sqrt{\tau^2}_{cop} + \tau^2_{eepm}$; $\sigma_{\rm kp}$ – критические нормальные напряжения изгиба и сжатия от действия внешней нагрузки; $\sigma_{\rm kp,M}$ – критические напряжения от местных нагрузок; $\tau_{\rm kp}$ – критические касательные напряжения; γ – коэффициент, учитывающий условия работы; Ω^{I} – коэффициент местной устойчивости относительно Р, ОЭ, БУ.

В связи с тем, что напряжения наиболее нагруженных узлов TC определяются в зависимости от возмущающей нагрузки (горизонтальной и вертикальной), возмущающая нагрузка – от перемещений, а перемещения – от времени, получаем максимальные напряжения TC в функции времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований была разработана методика контроля общей и местной устойчивости TC, использование которой обеспечивает повышение степени безопасной эксплуатации стреловых грузоподъемных кранов.

Применение предлагаемого метода расчета на общую устойчивость TC позволяет при проектировании автоматизировано определять грузовысотные характеристики и соответствующие параметры рабочего оборудования, обеспечивающие устойчивое состояние системы. Также включение разработанной методики расчета на общую устойчивое состояние системы общую устойчивость TC в систему безопасности CCK позволяет в режиме реального времени при выполнении краном рабочих операций отслеживать общее устойчивое состояние механической системы в функции характеристик TC.

Использование предлагаемого метода расчета на местную устойчивость позволяет при проектировании и эксплуатации отслеживать в режиме реального времени максимальное напряженное состояние ТС, являющееся критерием местной устойчивости, что предоставляет возможность контролировать устойчивое состояние полок и стенок наиболее нагруженных элементов TC. Предлагаемая методика расчета напряженного состояния учитывает совместное действие внешних горизонтальных и вертикальных нагрузок, а также местных нагрузок от опорных элементов и боковых упоров. Данное нагружение, несмотря на наличие ряда работ^{15, 16} [6, 7, 8, 9, 10], посвященных исследованию местных и внешних вертикальных нагрузок ТС, было рассмотрено впервые. Применение расчета на местную устойчивость предоставляет возможность при резком возрастании напряжения (коэффициента местной устойчивости) заблаговременно предпринять меры по устранению аварии или снижению последствий аварийной ситуации без участия оператора: например, включение автоматической блокировки всех исполнительных устройств, формирование предупредительных сигналов и активизирование средств, действие которых направлено на предотврашение превышения максимальных напряжений ТС и коэффициента местной устойчивости их допустимого значения. Кроме того, отслеживание наибольшего напряженного состояния позволит оценивать текущее техническое состояние телескопического стрелового оборудования, в результате чего представляется возможным своевременное проведение ремонта TC, замена всего оборудования или его элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Томаков В.И., Томаков М.В. Состояние промышленной безопасности при эксплуатации грузоподъёмных кранов на объектах, подконтрольных Ростехнадзору // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Техника и технологии». 2017. № 1 (22). С. 27–41.

2. Лагерев А.В., Кончиц С.В., Блейшмидт Л.И. Оценка риска при эксплуатации самоходных грузоподъемных кранов стрелового типа в условиях недостаточной информации // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2017. № 2. С. 77–94.

3. Wu J., Guzzomi A., Hodkiwicz M. Static stability analysis of non-slewing articulated mobile cranes // Australian Journal of Mechanical Engineering, 2014, №12(1), pp. 66–76.

120

¹⁵ Ряхин В.А., Мошкарев Г.И. Долговечность и устойчивость сварных конструкций строительных и дорожных машин. 232 с.

¹⁶ Гохберг М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. 520 с.

4. Qian Jb., Bao Lp., Yuan Rb., Yang Xj. Modeling and Analysis of Outrigger Reaction Forces of Hydraulic Mobile Crane // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications, 2017, Vol. 30, № 8, pp. 1246–1252.

5. Мамаев К.М. Математическое моделирование нагрузок автокрана и возможность расширения его характеристик грузоподъемности // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2011. № 4(23). С. 76–80.

6. Cui Z., Jlang 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.

7. Ряхин В.А., Гривезирский Ю.В., Гольдин Ю.М. Анализ местной нагруженности крановых телескопических стрел методом конечных элементов // Строит. и дорож. машины. 1984. №4. C. 22–24.

8. 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.

9. Fujita H., Sugiyama H. Development of flexible telescopic boom model using absolute nodal coordinate formulation sliding joint constraints with LuGre friction. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2012, vol. 2, Issue 6. 063005.

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

REFERENCES

1. Tomakov V.I., Tomakov M.V. Sostoyanie promyshlennoj bezopasnosti pri ehkspluatacii gruzopod"yomnyh kranov na ob"ektah, podkontrol'nyh Rostekhnadzoru [State of industrial safety in the operation of cranes at sites controlled by Rostechnadzor]. Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika *i tekhnologii*, 2017; 1 (22): 27–41 (in Russian).

2. Lagerev A.V., Konchic S.V., Blejshmidt L.I. Ocenka riska pri ehkspluatacii samohodnyh gruzopod"emnyh kranov strelovogo tipa v usloviyah nedostatochnoj informacii [Risk assessment in the operation of self-propelled boom cranes with insufficien information]. Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2017; 2: 77-94 (in Russian).

3. Wu J., Guzzomi A., Hodkiwicz M. Static stability analysis of non-slewing articulated mobile cranes. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2014; 12(1): 66-76.

4. Qian Jb., Bao Lp., Yuan Rb., Yang Xj. Modeling and Analysis of Outrigger Reaction Forces of Hydraulic Mobile Crane. International Journal of Engineering, Transactions B: Applications, 2017; 8 (30): 1246-1252.

5. Mamaev K.M. Matematicheskoe modelirovanie nagruzok avtokrana i vozmozhnosť rasshireniya ego harakteristik gruzopod"emnosti [Mathematical modeling of truck crane loads and the possibility of expanding its load-carrying characteristics]. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki, 2011; 4(23): 76-80 (in Russian).

6. Cui Z., Jlang 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; 33.1-33.10.

7. Ryahin V.A., Grivezirskij YU.V., Gol'din YU.M. Analiz mestnoj nagruzhennosti kranovyh teleskopicheskih strel metodom konechnyh ehlementov [Analysis of the local loading of crane telescopic arrows by the finite element method]. Stroit. i dorozh. Mashiny, 1984; 4: 22-24 (in Russian).

8. 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; 85: 332-340.

9. Fujita H., Sugiyama H. Development of flexible telescopic boom model using absolute nodal coordinate formulation sliding joint constraints with LuGre friction. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2012; 2(6): 063005.

10. Pavlovic A., Fragassa C., Minak G. Buckling analysis of telescopic boom: theoretical and numerical verification of sliding pads. Tehnicki Vjesnik, 2017; 24(3): 729-735.

Поступила 13.03.2019, принята к публикации 12.04.2019. Автор прочитал и одобрил оконча-

тельный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Потахов Егор Александрович – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные, ПVтевые и строительные машины», ФГБОУ ВО ПГУПС, ORCID ID: 0000-0003-4206-9148 (190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, e-mail: epotakhov@mail.ru)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Potahov Egor Aleksandrovich – Postgraduate Student, Department of Lifting, Track and Construction Machines, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, ORCID ID: 0000-0003-4206-9148 (190031, St. Petersburg, 9 Moskovsky Ave., e-mail: epotakhov@mail.ru).