

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стихановский Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор Омского государственного университета путей сообщения (644046, г.Омск, пр. Маркса, 35, e-mail: bstish@mail.ru).

Stikhanovskiy Boris Nikolaevich – d-r of technical Sciences, professor Omsk State Transport University (644046, Marksa,35 prospekt, Omsk, Russia, e-mail bstish@mail.ru).

Стихановская Любовь Михайловна – кандидат технических наук, доцент Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644080, г.Омск, пр. Мира, 5, e-mail: stikhanovskaya@gmail.com).

Stikhanovskaya Lubov Mihailovna – candidate of technical Sciences, associate Professor Sibirskaya State Automobile and Highway University (644080, Mira,5 prospekt, Omsk, Russia, stikhanovskaya@gmail.com).



УДК 621.86/87

## ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА НА СТРЕЛЕ КРАНА – ТРУБОУКЛАДЧИКА НА ИЗМЕНЕНИЕ ГРУЗОВОГО МОМЕНТА

**Р.Ю. Сухарев, В.В. Танский**  
ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Основной особенностью эксплуатации кранов-трубоукладчиков является работа в сложных грунтовых условиях, что существенно влияет на режим работы машины. Данный фактор является одной из основных причин, приводящих к раскачиванию груза на стреле крана-трубоукладчика и, как следствие, аварийным и нештатным ситуациям. В работе рассмотрены вынужденные колебания груза на стреле крана-трубоукладчика, причины их возникновения и проблемы, к которым они приводят. Рассмотрены инженерные решения предшественников. Обоснован новый подход к решению данных проблем.

**Материалы и методы:** обоснована расчетная схема крана-трубоукладчика, приняты допущения, введены системы координат, составлена математическая модель крана-трубоукладчика.

**Результаты:** построены следующие временные зависимости: отклонение груза в поперечной плоскости крана-трубоукладчика (горизонтальные колебания), отклонение груза в продольной плоскости крана-трубоукладчика, крен базовой машины, изменение грузового момента. Определено влияние горизонтальных колебаний груза на изменение грузового момента и возникновение вертикальных колебаний.

**Обсуждение и заключение:** дана оценка влияния горизонтальных колебаний на изменение грузового момента и, как следствие, отрицательного влияния на устойчивость крана-трубоукладчика.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** кран-трубоукладчик, колебания, груз, грузовой момент, устойчивость, расчетная схема, однородные координаты, микрорельеф, отклонение груза.

#### ВВЕДЕНИЕ

Сложность прокладки трубопровода зачастую связана с удаленностью объектов строительства, с их расположением в болотистых районах со слабыми или вечномерзлыми грунтами [6,7,8]. В процессе укладки трубопровода в траншею нагрузка на крюке крана-трубоукладчика (КТ) изменяется в большом диапазоне [10] – от нулевой до максимальной. Причина такого колебания груза – это изменение высотного положения одного КТ относительно другого вследствие преодоления неровностей микрорельефа, а также колебания, возника-

ющие в системе [2,20]. Наличие неровностей микрорельефа при выполнении работ по обустройству газовых и нефтяных месторождений, прокладке трубопровода является одним из основных негативно влияющих факторов [8].

На сегодняшний день в работах предшественников рассматриваются вертикальные колебания трубопровода, приводящие к неравномерному распределению массы трубопровода и, как следствие, потере устойчивости КТ. Раскачивание трубопровода в горизонтальной плоскости в процессе укладки трубопровода может привести к удару трубы о стенку траншеи или стрелу КТ, что в свою очередь при-

## РАЗДЕЛ I.

### ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

водит к повреждению изоляции трубопровода и самой трубы. При наличии горизонтальных колебаний трубопровода снижается точность производимых работ и уменьшение скорости их выполнения. Существуют инженерные решения, направленные на снижение амплитуды колебания груза на стреле КТ [15,16,17,18], более старые решения хорошо рассмотрены в статье [19], однако вопрос влияния горизонтальных колебаний на изменения грузового момента и возникновения вертикальных колебаний раскрыт не полностью.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рисунке 1. представлена расчетная схема КТ. При составлении схемы были приняты следующие допущения: КТ является стационарной и голономной системой, кран представляет собой шарнирно-сочлененный многозвенник с наложенными на него упругими и динамическими связями, внешние силы, действующие на КТ, являются сосредоточенными, люфты и силы сухого трения в шарнирах отсутствуют [2,4].

Для оценки угловых перемещений КТ в поперечной плоскости были заданы следующие системы координат: инерциальная  $O_0X_0Y_0Z_0$ , локальная  $O_1X_1Y_1Z_1$  – поворот базовой машины на угол  $\alpha_1$ , локальная  $O_2X_2Y_2Z_2$  – поворот стрелы на угол  $\alpha_2$  и локальная  $O_3X_3Y_3Z_3$  – поворот грузового каната на угол  $\alpha_3$ . Расположение систем координат показано на рисунке 1. Все системы координат правые.

Введены обобщенные координаты, обозначение которых представлено в таблице 1,

Согласно методике однородных координат [1,2,3,5,9] были составлены матрицы перехода  $A_i$  от локальных систем координат к инерциальной. Получены матрицы скоростей  $U_{ij}$ . Координаты и скорости точек упруго-вязких тел описываются матрицами соответствующих звеньев, к которым принадлежат тела [11, 12].

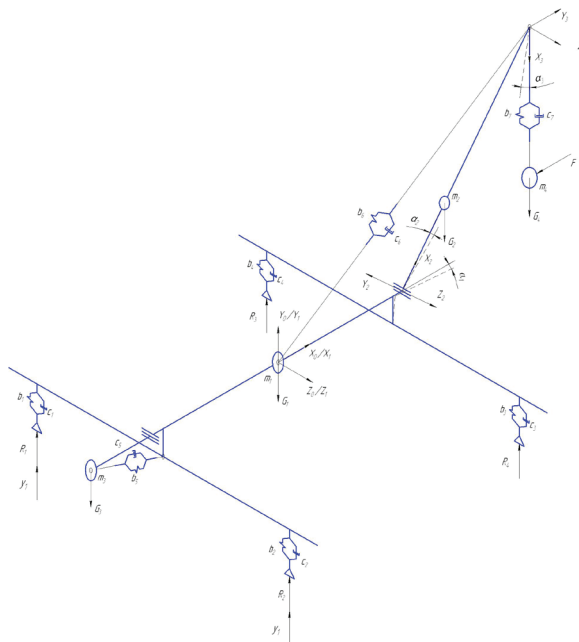


Рисунок 1 – Расчетная схема крана-трубоукладчика  
Drawing 1 – The design diagram of the pipe-laying crane

Полученные матрицы позволили составить уравнение Лагранжа второго рода в векторно-матричной форме для вынужденных колебаний системы [13, 14].

Таблица 1.  
СООТВЕТСТВИЕ МЕЖДУ УГЛОВЫМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ И ОБОБЩЕННЫМИ КООРДИНАТАМИ  
Table 1.

CORRESPONDENCE BETWEEN ANGULAR DISPLACEMENTS AND GENERALIZED COORDINATES

Перемещение/Moving	Обобщенная координата/ The generalized coordinate
Поворот базового трактора на угол $\alpha_1$ (крен)/ Turn the basic tractor to an angle $\alpha_1$ (heeling)	$q_1$
Поворот стрелы в на угол $\alpha_2$ / Rotating the boom in an angle $\alpha_2$	$q_2$
Поворот грузового каната на угол $\alpha_3$ / Turning the cargo rope to an angle $\alpha_3$	$q_3$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \text{tr} [U_{ij} H_i U_{iv}^T] q_j'' + \\ & + \sum_{u=1}^7 \sum_{j=1}^3 \text{tr} [M_{uj} B_u M_{uv}^T] q_j' + \\ & + \sum_{u=1}^7 \sum_{j=1}^3 \text{tr} [M_{uj} N_u M_{uv}^T] q_j + \\ & + \sum_{i=1}^3 m_i g G^T U_{iv} \vec{R}_i = \vec{F}_r U_{iv} \vec{R}_{ir}, \quad (1) \end{aligned}$$

где 3 – количество звеньев, 3 – количество степеней свободы, 7 – количество упругих элементов,  $U_{ij}$  – матрица скорости  $i$ -го элемента по  $j$ -й координате,  $H_i$  – матрица инерционности  $i$ -го элемента,  $M_{uj}$  – матрица деформации  $u$ -го упругого элемента по  $j$ -й координате,  $N_u$  – матрица упругости,  $B_u$  – матрица вязкости  $u$ -го упругого элемента,  $G^T$  – вектор сил тяжести

звеньев системы,  $\vec{R}_i$  – радиус вектор  $i$ -го звена,  $m_i$  – масса  $i$ -го звена,  $M_{uv}^T$  – транспонированная матрица деформации  $u$  – упругого элемента,  $U_{iv}^T$  – транспонированная матрица скорости  $i$ -го элемента;  $q_j$  – обобщенная координата по степени свободы  $j$ ,  $\vec{F}_r$  – внешняя сила, приложенная к  $i$ -му звену расчетной схемы,  $U_{iv}$  – матрица скорости  $i$ -го элемента,  $\vec{R}_{ir}$  – вектор в локальной системе координат звена точки приложения силы.

С целью изучения влияния горизонтальных колебаний груза на стреле крана - трубоукладчика на возникновение вертикальных колебаний был проведен машинный эксперимент. На рисунке 1 показана схема его проведения.

В ходе эксперимента на правую гусеницу КТ подавалось возмущение  $y_b$  со стороны микрорельефа, импульсное воздействие, что приводило к вынужденным колебаниям груза. С целью выявления взаимосвязи отклонения груза в горизонтальной плоскости на его вертикальные колебания сравнивались следующие временные зависимости:

- отклонение груза по оси  $X$ , как плечо центра масс груза  $l_{ep}$  – расстояние от ребра опрокидывания до центра масс груза;

- отклонение груза по оси  $Y$  как расстояние от опорной поверхности до центра масс груза;

- угол крена базовой машины  $\alpha$ ;

- изменение  $M_{ep}$  грузового момента.

Грузовой момент рассчитывался по формуле 2 [2]

$$M_{ep} = G_{ep} \cdot l_{ep}, \quad (2)$$

где:  $G_{ep}$  – вес груза,  $l_{ep}$  – текущее плечо центра масс груза относительно ребра опрокидывания [2].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Из рисунка 2 видно, что колебания высотной координаты груза по  $Y$  убывают неравномерно, периодически возрастают, что вызвано колебанием угла крена крана – трубоукладчика. Рассмотрим участок кривой на верхнем графике (колебание груза по оси  $X$ ) от точки 1 до точки 2, что соответствует раскачиванию груза, уже воспринявшего возмущающее воздействие, от самой ближней точки к ребру опрокидывания до самой дальней. Из графика видно, что по мере удаления груза от ребра опрокидывания возрастает  $l_{ep}$ , что соответственно приводит к увеличению  $M_{ep}$ . По мере увеличения грузового момента возрастает и значение по модулю угла крена базовой машины, достигая максимума (точка 6), одновременно с грузовым моментом (точка 8).

Таким образом груз, совершая колебания в сторону от стрелы, возвращается не на высоту с учетом затухания колебаний, а на высоту с учетом крена базовой машины, вследствие изменения грузового момента и с учетом затухания колебаний (точка 4).

В случае подачи возмущения со стороны груза происходит отклонение его в сторону от стрелы. Наблюдается тот же характер затухания колебаний по  $Y$  и изменения грузового момента, что и в первом случае, рисунок 3.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Горизонтальные колебания груза приводят к колебанию грузового момента и как результат вертикальным колебаниям груза.

Такое взаимовлияние повышает вероятность возникновения аварийных ситуаций в ходе производства работ, так как способствует процессу накопления колебаний в системе вследствие изменения грузового момента.

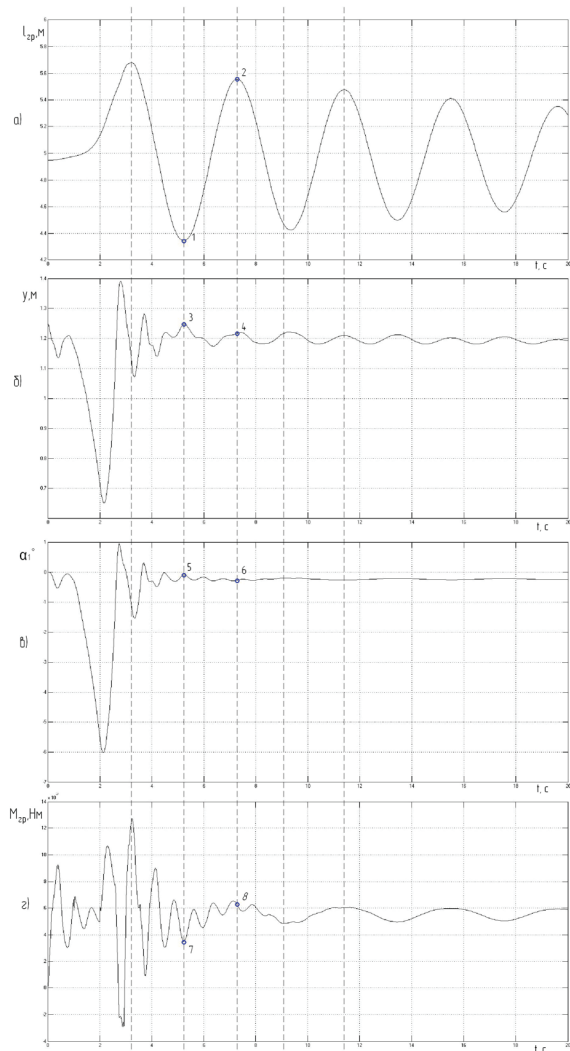


Рисунок 2:

а) отклонение груза по оси  $X_0$ ;  
 б) отклонение груза по оси  $Y_0$ ; в) крен базовой машины;  
 г) изменение грузозового момента;

Illustration 2:

a) deviation of cargo along the  $X_0$  axis;  
 б) deviation of cargo along the  $Y_0$  axis;  
 в) roll of the base machine; г) change of cargo moment

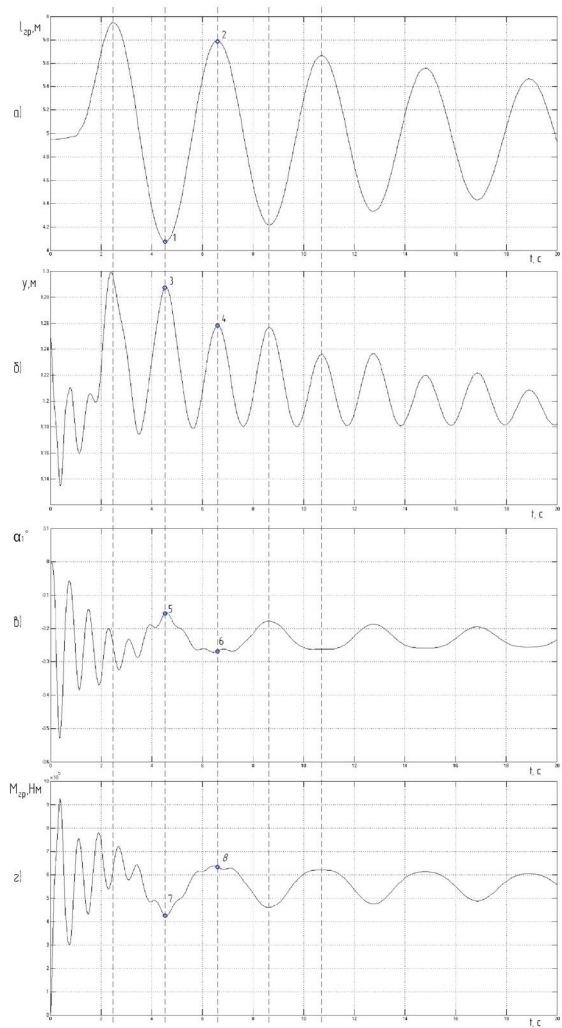


Рисунок 3:

а) отклонение груза по оси  $X_0$ ;  
 б) отклонение груза по оси  $Y_0$ ; в) крен базовой машины;  
 г) изменение грузозового момента;

Illustration 3:

a) deviation of cargo along the  $X_0$  axis;  
 б) deviation of cargo along the  $Y_0$  axis;  
 в) roll of the base machine; г) change of cargo moment

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щербаков В.С., Корытов М.С., Котыкин С.В. Система автоматизации моделирования стреловых грузоподъемных кранов. Омск : СибАДИ, 2012. 143 с.
2. Щербаков В.С., Шабалин А. Н., Корытов М.С. Методы управления комплектом машин трубоукладочной колонны. Омск : СибАДИ, 2014. 151 с.
3. Щербаков В.С., Сухарев Р.Ю. Совершенствование системы управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора. Омск : СибАДИ, 2011. 149 с.
4. Танский В.В. Влияние координат точки крепления уравновешивающего каната на колебания груза крана – трубоукладчика // Вестник СибАДИ. 2017. № 1(53). С. 48 – 53.
5. Щербаков В.С., Реброва И.А., Корытов М.С., Постухова Е.И. Автоматизация процесса моделирования траектории движения рабочего органа робота манипулятора.

Омск: Филиал ГОУ ВПО «Российский заочный институт текстильной и легкой промышленности» в г. Омске. 2009. 120 с.

6. Горбатилов В.А., Соколов С.М., Пальянов П.А. Проектирование обустройства нефтяных месторождений и его научное обоснование // Нефтяное хозяйство. 2005. № 9. С. 114 – 119.

7. Минкин М.А., Потапова О.А. Особенности обустройства нефтяных и газовых месторождений России и основания и фундаменты зданий и сооружений // Вестник Московского государственного строительного университета. 2006. № 1. С. 180 – 187.

8. Попов М.Ю., Осипов С.П. Особенности эксплуатации стреловых кранов и кранов-трубоукладчиков в режиме перемещения с грузом в условиях промышленного бездорожья // Механизация строительства. 2013. № 11(833). С. 22 – 25.

9. Система управления краном – трубоукладчиком исключая опрокидывание трубоукладочной колонны/ Шабалин А.Н. // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием) «Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования». Омск. 2012. С. 83 – 87.

10. Семенов Е.Л. Капитальный ремонт магистральных трубопроводов с применением грунтовых и инвентарных опор // Трубопроводный транспорт: теория и практика. № 4(26). 2011. С. 25 – 27.

11. Щербаков В.С., Милушенко С.А. Совершенствование системы управления выглаживающей плитой асфальтоукладчика. Омск: СибАДИ, 2010. 161 с.

12. Щербаков В.С., Корытов М.С., Григорьев М.Г. Автоматизация проектирования устройств управления положением платформы строительной машины. Омск: СибАДИ, 2011. 119 с.

13. Щербаков В.С., Корытов М.С., Архипенко М.Ю., Камуз Н.А. Стабилизация несущей платформы в горизонтальной плоскости // Строительные и дорожные машины. 2013. № 2. С. 36 – 40.

14. Щербаков В.С., Корытов М.С., Камуз Н.А. Методика проверки положения грузоподъемного крана в про-

странстве конфигураций по ограничению на устойчивость // Материалы 66-й Междунар. науч.-практ. конф. «Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования – основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России». Омск, 2012. С. 408 – 412.

15. Кран-трубоукладчик: пат. 131 371 Российская Федерация, МПК В66С23/88./ Щербаков В.С., Шабалин А.Н. № 2013115403/11. 2 с.

16. Кран-трубоукладчик: пат. 140 492 Российская Федерация, МПК В66С23/88./ Щербаков В.С., Шабалин А.Н. № 2013155099/11. 2 с.

17. Кран-трубоукладчик: пат. 158 094 Российская Федерация, МПК В66С23/26./ Щербаков В.С., Корытов М.С., Танский В.В. № 2015120191/11. 2 с.

18. Кран-трубоукладчик: пат. 158 181 Российская Федерация, МПК В66С23/26./ Щербаков В.С., Танский В.В. № 2015120193/11. 2 с.

19. Шабалин А.Н. Система стабилизации нагрузки на кран – трубоукладчик // Вестник СибАДИ. 2013. № 2(30). С. 29 – 34.

20. Танский В.В. Обоснование расчетной схемы крана-трубоукладчика // Техника и технологии строительства. 2017. № 4(8). С. 54 – 60.

## THE INFLUENCE OF THE HORIZONTAL LOAD VIBRATIONS OF THE CRANE-PIPE LAYING MACHINE GIBBET ON THE LOAD MOMENT STABILITY

R.Yu. Sukharev, V.V. Tanskiy

### ANNOTATION

**Introduction:** the main feature of operation of cranes-pipe layers is work in difficult ground conditions, which significantly affects the operating mode of the machine. This factor is one of the main reason leading to the rocking of the load on the crane-pipe laying machine gibbet and as a consequence it leads to emergency and contingency situations. In the research the forced vibration of the load on the crane-pipe layer gibbet and the causes of their occurrence and the problems to which they lead are observed. Engineering solutions of predecessors are considered. A new approach to the solution of these problems is proved.

**Materials and methods:** the design scheme of the crane-pipe laying machine is justified, assumptions are accepted, coordinate systems are introduced, and a mathematical model of the crane-pipe-laying machine is compiled.

**Results:** the following time dependences are constructed: the deflection of the cargo in the transverse plane of the crane-pipe layer (horizontal vibrations), the deflection of the cargo in the longitudinal plane of the pipe laying crane, the roll of the base machine, the change in the load moment are also constructed. The influence of the horizontal vibrations of the load on the change in the load moment and the occurrence of vertical vibrations is determined.

**Discussion and conclusion:** the effect of horizontal vibrations on the change of the load moment is evaluated and as a consequence of the negative effect on the stability of the crane-pipe laying machine is presented.

**KEYWORDS:** Crane-pipe laying machine, vibrations, cargo, load moment, stability, design scheme, homogeneous coordinates, microrelief, load deflection.

### REFERENCES

1. Sherbakov V.S., Koritov M.S., Kotkin S.V. Sistema avtomatizatsii modelirovaniya strelovykh gruzopod'yemnykh kranov [The automation system simulation jib cranes]. Омск, SibADI, 2012, 143 p.

2. Sherbakov V.S., Koritov M.S., Shabalin A. N. Metody

upravleniya komplektom mashin truboukladochnoy kolonny [A set of management practices of the column pipe-laying machines]. Омск, SibADI, 2014, 151 p.

3. Sherbakov V.S., Sukharev R.Y. Sovershenstvovaniye sistemy upravleniya rabochim organom tsepnogo transheynogo ekskavatora [Improving governance working body of the chain trencher]. Омск, SibADI, 2011, 149 p.

