

УДК 621.86./87

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КОМПЛЕКТА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН ТРУБОУКЛАДОЧНОЙ КОЛОННЫ

Щербаков Виталий Сергеевич,

д-р техн. наук, профессор, декан факультета «Нефтегазовая и строительная техника» Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ), Россия, 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5.
E-mail: sherbakov_vs@sibadi.org

Корытов Михаил Сергеевич,

д-р техн. наук, профессор кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ), Россия, 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5. E-mail: kms142@mail.ru

Шабалин Андрей Николаевич,

аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехника» Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ), Россия, 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5.
E-mail: andrei-shabalin@mail.ru

В современной России из-за нестабильных политических отношений с соседними государствами реализуется крупная программа проектирования и строительства транснациональных магистральных трубопроводных систем. Обеспечение грузовой устойчивости комплекта машин трубоукладочной колонны является основной проблемой, с которой сталкиваются во время укладки трубопровода в траншею. Причинами потери краном-трубоукладчиком грузовой устойчивости являются: 1. малоопытные машинисты крана-трубоукладчика, которые, реагируя на частичную потерю грузовой устойчивости, чрезмерно разгружают свою машину, перегружая тем самым ее соседние; 2. неровности микрорельефа, по которому двигаются краны-трубоукладчики. Из всего сказанного можно сделать вывод о необходимости создания устройства управления трубоукладочной колонной, которое бы решило следующие проблемы: 1. предотвращение аварийных ситуаций в рабочем процессе трубоукладочной колонны; 2. облегчение труда машинистов крана-трубоукладчика; 3. уменьшение автоколебаний трубопровода; 4. обеспечение равной загрузки всех кранов-трубоукладчиков, входящих в трубоукладочную колонну.

Цель работы: повышение безопасности рабочего процесса трубоукладочной колонны, предотвращение аварийной ситуации.

Методы исследования основываются на анализе и синтезе полученных результатов исследования; теоретические исследования базируются на математическом анализе, методах имитационного моделирования; экспериментальные исследования основаны на использовании теории планирования эксперимента и методах статистической обработки данных.

Результаты: На примере трубоукладочной колонны изучены особенности рабочего процесса комплекта грузоподъемных машин с целью обеспечения безопасности выполняемых работ. Предложена теоретическая концепция, основанная на компенсации возникающих во время рабочего процесса динамических воздействий на грузоподъемную технику. Разработано устройство управления комплектом машин, обеспечивающее грузовую устойчивость трубоукладочной колонны. Предложена перспективная модель крана-трубоукладчика с устройством стабилизации грузового момента.

Ключевые слова:

Трубоукладочная колонна, комплект машин, кран-трубоукладчик, система управления, момент устойчивости, расчетная схема, однородные координаты.

Введение

Обеспечение безопасности рабочего процесса грузоподъемных машин является актуальной проблемой по следующим причинам: *во-первых*, человек, занятый в производственном процессе, должен быть уверен в своей безопасности; *во-вторых*, аварийные ситуации приводят к большим финансовым затратам. Для обеспечения безопасности производственного процесса грузоподъемных машин создано множество различных устройств и систем безопасности, направленных на сохранение устойчивости грузоподъемных машин, принцип действия которых основан на огра-

ничении грузового момента, создаваемого самим краном. Данный подход работает для случая работы отдельно стоящей машины с собственным единичным грузом. В рабочем процессе комплекта машин с общим грузом есть свои особенности, которые делают все эти устройства неэффективными. Предложена теоретическая концепция обеспечения безопасности рабочего процесса комплекта грузоподъемных машин на примере трубоукладочной колонны, основанная на компенсации возникающих во время рабочего процесса динамических воздействий на грузоподъемную технику [1–6].

Направления и методы повышения безопасности рабочего процесса комплекта грузоподъемных машин трубоукладочной колонны

Типичным примером комплекта грузоподъемных машин является трубоукладочная колонна, состоящая из нескольких кранов-трубоукладчиков. Кран-трубоукладчик (КТ) – это строительная машина, созданная на базе трактора с увеличенной шириной базы и смещенным центром тяжести, оснащенного боковой стрелой А-образной формы [7, 8]. Рабочий процесс трубоукладочной колонны заключается в движении колонны вдоль трубопровода, поднятии его условно неограниченного участка с одновременным смещением к оси траншеи. Сложность задачи заключается в том, что укладка трубопровода требует согласованных действий всех участников рабочего процесса. На машинистов КТ колонны возложена корректировка расстояния между машинами, движущимися вдоль оси траншеи, угла наклона стрелы КТ, высоты подвеса крюковой обоймы КТ. При движении колонна перемещается по естественному рельефу, все КТ связаны между собой трубопроводом, что делает трубоукладочную колонну сложной динамической системой.

При движении трубоукладочной колонны по неровностям рельефа происходит постоянное перераспределение нагрузки между кранами трубоукладчиками, машинисты КТ не всегда правильно оценивают загруженность своих КТ и чрезмерно разгружают их, тем самым перегружая соседние

КТ. Поэтому высота подвеса крюковой обоймы должна регулироваться на основе текущего состояния высот всех КТ и их грузовых моментов. С целью предотвращения повреждения трубопровода расстояния между КТ должны варьироваться строго в рамках расстояний, указанных в технологической схеме, что зачастую машинисту КТ не удается выполнить. Трубоукладочная колонна – это сложная динамическая система, где взаимодействуют между собой две динамические системы: трубопровод и кран-трубоукладчик. Каждая из них имеет собственную частоту колебаний. При совпадении по частоте колебаний трубопровода и собственных колебаний КТ происходит вхождение всей трубоукладочной колонны в резонанс, в результате чего происходит опрокидывание колонны. Излишнее раскачивание трубопровода на крюках кранов-трубоукладчиков можно предотвратить, обеспечив плавный подъем и опускание крюковой обоймы и исключив излишние включения устройства управления [9, 10].

Для решения поставленной задачи необходимо разработать математическую модель сложной динамической системы «трубоукладочная колонна». Ее условно можно разделить на следующие подсистемы: краны-трубоукладчики, трубопровод, гидропривод, рельеф. Для создания универсальной математической модели, которая будет отражать особенности большинства существующих моделей КТ, необходимо разработать пространственные расчетные схемы КТ (рис. 1) и трубопровода (рис. 2).

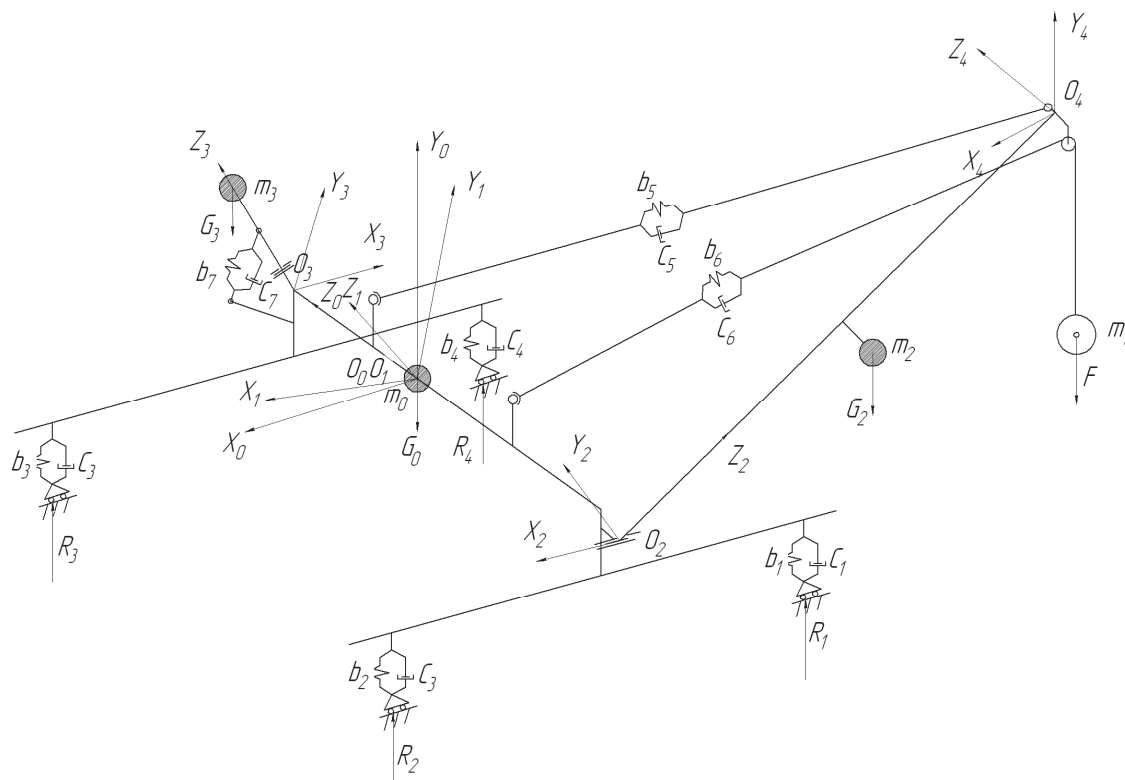


Рис. 1. Обобщенная пространственная расчетная схема отдельного крана-трубоукладчика в составе трубоукладочной колонны

Fig. 1. Generalized three-dimensional design pattern of a single pipe-layer crane in pipe-laying column

При составлении пространственных обобщенных расчетных схем на основании анализа конструкций и условий работы КТ примем следующие допущения: 1) КТ и трубопровод являются голономными и стационарными системами; 2) КТ и трубопровод представляют собой шарнирно-сочлененные многозвеньники с наложенными на них упруго-вязкими и динамическими связями; 3) Внешние силы, действующие на КТ и трубопровод, являются сосредоточенными; 4) Люфты и силы сухого трения в шарнирах отсутствуют; 5) Колебания элементов КТ и трубопровода малы.

На рис. 1 изображена пространственная обобщенная расчетная схема КТ, представляющего собой шарнирно-сочлененный многозвеньник, звеньями которого являются: базовая машина массой m_1 ; стрела КТ массой m_2 ; противовес КТ массой m_3 ; трубопровод массой m_4 [7, 8, 11].

На рис. 2 представлена пространственная расчетная схема трубопровода, описанного в виде шарнирно-сочлененного многозвеньника, звенья которого расположены вдоль оси трубопровода и по окружности с массами m_{ij} [12].

Для разработки динамической модели КТ и трубопровода применялся метод уравнений Лагранжа второго рода. Каждое из уравнений Лагранжа второго рода для голономной системы с числом степеней свободы, равным l , которым соответствуют обобщенные координаты q_j ($j=1, \dots, l$), будет иметь вид [13, 14]:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right] - \frac{\partial K}{\partial q_j} + \frac{\partial P}{\partial q_j} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_j} = F_j. \quad (1)$$

где t – время; q_j – обобщенная координата; K – кинетическая энергия; P – потенциальная энергия; Φ – диссипативная функция; $\dot{q}_j$ – обобщенная скорость; F_j – обобщенная сила, действующая по обобщенной координате.

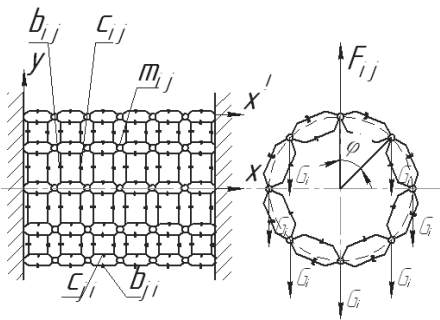


Рис. 2. Обобщенная пространственная расчетная схема трубопровода

Fig. 2. Generalized three-dimensional design pattern of a pipe-line

В векторно-матричной форме система дифференциальных уравнений будет иметь вид [13, 14]:

$$A \cdot \ddot{\vec{q}} + B \cdot \dot{\vec{q}} + C \cdot \vec{q} = \vec{F}, \quad (2)$$

где A , B , C – матрицы коэффициентов дифференциальных уравнений (A – матрица инерционных коэффициентов, B – матрица коэффициентов

демпфирования, C – матрица коэффициентов жесткости); $\vec{q}$, $\dot{\vec{q}}$, $\ddot{\vec{q}}$ – векторы соответственно ускорения, скорости и обобщенных координат; $\vec{F}$ – вектор внешних сил, действующих по обобщенным координатам.

После подстановки всех слагаемых в уравнение Лагранжа (1), (2), получим в общем виде уравнение системы дифференциальных уравнений [13–16]:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l tr[U_{ij} H_i U_{iv}^T] \dot{q}_j' + \sum_{u=1}^n \sum_{v=1}^l tr[M_{uv} B_u M_{uv}^T] \dot{q}_j' + \sum_{u=1}^n \sum_{v=1}^l tr[M_{uv} N_u M_{uv}^T] \dot{q}_j + \sum_{i=1}^k m_i g G^T U_{iv} \vec{R}_i = \sum_{r=1}^m \vec{F}_r U_{iv} \vec{R}_{ir}. \quad (3)$$

Коэффициенты дифференциальных уравнений являются функциями больших значений обобщенных координат и конструктивных параметров.

Результатом решения системы дифференциальных уравнений (3), как с замороженными, так и с переменными коэффициентами, являются временные зависимости изменения обобщенных координат, отражающие изменение положения элементов КТ в пространстве.

Математическая модель КТ вида (3), составленная на основе предложенной методики, позволяет решать задачи статики, кинематики и динамики, проводить исследования КТ в различных эксплуатационных режимах.

Используя данную математическую модель, можно исследовать зависимость грузового момента КТ от всех факторов, существенно влияющих на устойчивость отдельного КТ и трубоукладочной колонны в целом.

Для обеспечения безопасности рабочего процесса трубоукладочной колонны предлагается установить систему автоматического управления, которая будет корректировать расстояния между машинами и контролировать равную загруженность всех КТ, регулируя высоту подвеса крюковой обоймы [17].

Данная система использует в качестве первичных информационных параметров следующие величины: F – сила на крюке; α – угол наклона КТ в поперечной плоскости; l – расстояние до идущего позади КТ; n – число оборотов грузовой лебедки; γ – угол наклона стрелы КТ.

В качестве сигналов управления выступают $i_{\text{упр}}$ – сигнал изменения высоты подвеса крюковой обоймы, $l_{\text{упр}}$ – сигнал изменения расстояния между КТ.

Для компенсации динамических воздействий, вызванных неровностями рельефа, по которому движутся КТ, и воздействий, вызванных колебаниями трубопровода, на КТ предлагается установить устройство стабилизации грузового момента, принципиальная схема которого представлена на рис. 3. Принцип действия устройства стабилизации заключается в том, что на базовую машину –

1 дополнительно устанавливается упруго-вязкая связь – 8, один конец которой неподвижно закреплен, а к другому прикреплен шкив – 9, через который проходит грузовой канат – 4. Параметры упруго-вязкой связи подобраны так, что при приближении грузового момента к моменту устойчивости происходит удлинение грузового каната и перераспределение нагрузки между различными КТ колонны. Принцип работы устройства стабилизации грузового момента (УСГМ) заключается в следующем: КТ, работающий в колонне, двигается по неровностям микрорельефа. Это приводит к тому, что высота подвеса крюковой обоймы КТ постоянно изменяется. Изменение высоты подвеса крюковой обоймы – 6 приводит к перераспределению нагрузки между КТ трубоукладочной колонны. На одних КТ нагрузка увеличивается, на других – уменьшается. Машинисты КТ не успевают реагировать на изменение силы на крюке. Установка на КТ упруговязкого элемента – 8 со шкивом – 9 позволяет снизить влияние неровностей микрорельефа на изменение динамических нагрузок и на устойчивость единичных КТ и трубоукладочной колонны в целом. При достижении нагрузки на крюковой обойме – 6 значения, больше необходимого для устойчивого движения КТ, пружина – 8 начинает растягиваться. Это приводит к опусканию крюковой обоймы на значение, достаточное для выравнивания нагрузки с соседними КТ. После снижения нагрузки на крюковой обойме – 6 пружина – 8 сжимается.

Основными требованиями, которым должна удовлетворять система управления, являются: динамическая устойчивость колонны, предотвращение излома трубопровода и облегчение труда машинистов КТ. Безопасность работ, прежде всего, связана с устойчивостью колонны, что достигается равномерной загруженностью КТ за счет изменения высоты крюковой обоймы и расстояния между

КТ и изменением частоты колебания трубопровода, с целью исключения ситуации совпадения частоты колебания трубопровода и отдельных КТ.

Частотный спектр динамических воздействий трубопровода на КТ достаточно широк, его условно можно разделить на две группы: высокочастотные и низкочастотные воздействия. На поперечную устойчивость КТ оказывают влияние низкочастотные колебания. Особую опасность представляют резонансные частоты, когда собственные частоты колебаний элементов КТ совпадают с частотой воздействий. Поэтому основной задачей УСГМ является предотвращение совпадения по частоте этих колебаний. Используя описанную математическую модель КТ и результаты экспериментальных исследований, можно определить частоту собственных колебаний КТ и трубопровода.

Для расчета колебаний УСГМ необходимо знать массу на крюке отдельного КТ, приведенные коэффициенты жесткости и вязкости УСГМ, а также передаточное отношение полиспаста. Уравнение движения крюковой обоймы КТ в случае применения УСГМ будет иметь вид неоднородного дифференциального уравнения второго рода:

$$\frac{m}{i} \cdot y'' + by' + cy = F_0(t), \quad (4)$$

где m – масса груза; i – кратность полиспаста; b – вязкость УСГМ; c – жесткость УСГМ; F_0 – сила, действующая на крюковую обойму; t – время.

Передаточная функция данного колебательно-го звена:

$$W(p) = \frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (5)$$

где p – оператор Лапласа, $k=1/c$, $T_1=m/c$, $T_2=b/c$.

Введено понятие ξ – коэффициента колебательности:

$$\xi = T_2 / (2T_1), \quad (6)$$

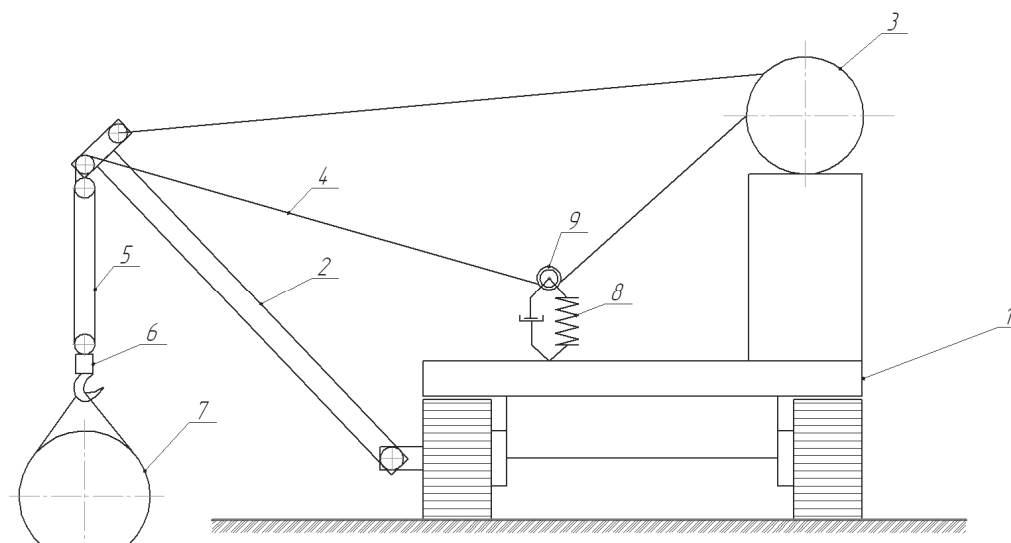


Рис. 3. Схема устройства стабилизации грузового момента крана-трубоукладчика

Fig. 3. Diagram of a stabilization device of a pipe-layer crane cargo moment

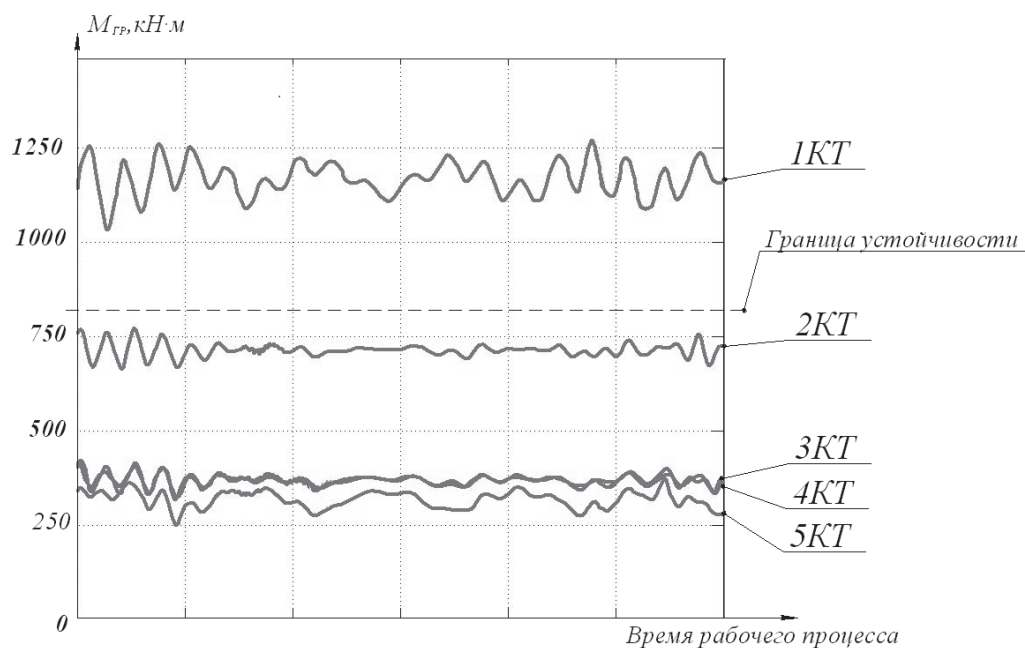


Рис. 4. Графическая зависимость изменения грузового момента кранов-трубоукладчиков, входящих в состав трубоукладочной колонны с типовыми устройствами безопасности

Fig. 4. The curve of changing cargo moment of pipe-layer cranes in pipe-laying column with typical safety device

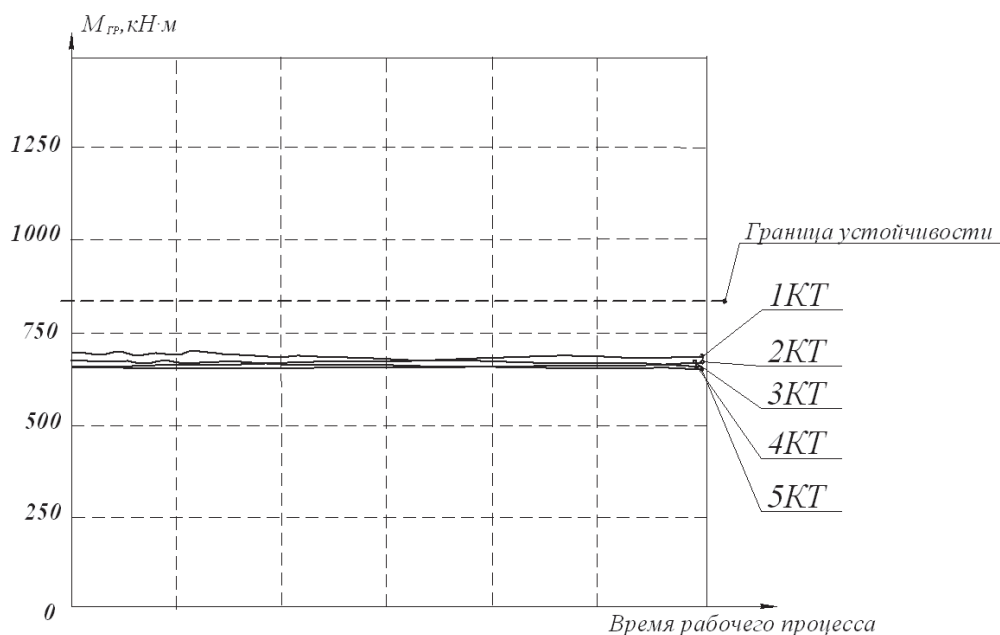


Рис. 5. Графическая зависимость изменения грузового момента кранов-трубоукладчиков, входящих в состав трубоукладочной колонны с системой автоматического управления и устройством стабилизации грузового момента

Fig. 5. The curve of changing cargo moment of pipe-layer cranes in pipe-laying column with automated control system and cargo moment stabilization device

При подстановке коэффициента колебательности в уравнение (5) получено выражение:

$$W(p) = k / (T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1), \quad (7)$$

Если $\xi < 1$, то звено колебательное; если $\xi \geq 1$, то колебательное звено вырождается в аperiodическое звено 2-го порядка.

При проведении теоретических исследований в качестве примера была исследована колонна из пяти КТ марки ТГ-503 номинальной грузоподъемностью 50 т на плече 2,5 м. Производит данную марку КТ Чебоксарский тракторный завод. Был исследован трубопровод диаметром 1420 мм, с толщиной стенки 40 мм. Марка стали Ст 20. Скорость движения колонны была принята равной 1 м/с.

Статистические параметры микрорельефа принимали значения: $\alpha_1=0,53 \text{ с}^{-1}$; $\alpha_2=0,138 \text{ с}^{-1}$; $\beta_1=0,79 \text{ с}^{-1}$; $\beta_2=3,7 \text{ с}^{-1}$. Время моделирования было принято равным 100 с.

Моделировался установленный на КТ марки ТГ-503 типовой гидронасос НШ-100А-50А3 с номинальным давлением 16 МПа. Его рабочий объем 250 см³ при угловой скорости 157 рад/с, подача $35,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{рад}$ (335 л/мин).

Оценить эффективность внедрения автоматической системы управления и УСГМ можно с помощью функциональной зависимости грузового момента $M_{гр}$ кранов-трубоукладчиков без данных устройств (рис. 4) и с ними (рис. 5). Для этого математическая модель сложной динамической системы была смоделирована в программном продукте MATLAB [18–22].

По функциональным зависимостям видно, что грузовые моменты отдельных КТ в колонне без автоматической системы управления и УСГМ сильно отличаются друг от друга. Диапазон значений около 1000 кН/м. Крайние КТ сильно перегружены, в то время как КТ, находящиеся в середине колонны, имеют малую загруженность, что недопустимо, т. к.

это приводит к потере грузовой устойчивости всей трубоукладочной колонны. При этом неровности микрорельефа вызывают динамические воздействия высокой частоты в диапазоне 200 кН/м, что приводит к обрывам грузовых канатов и преждевременному износу навесного и ходового оборудования.

Заключение

Анализ результатов проведенных исследований позволил сделать следующие выводы. Для обеспечения безопасности рабочего процесса трубоукладочной колонны недостаточно типовых устройств безопасности, применяемых на грузоподъемной технике, необходимо внедрение устройств, которые будут компенсировать появляющиеся внешние динамические воздействия. Внедрение системы автоматического управления и устройства стабилизации грузового момента не только облегчает труд машинистов, но и делает его безопасным, поскольку грузовые моменты различных КТ в колонне при этом стремятся к одинаковому значению, не превышая при этом момент устойчивости КТ. Максимальный грузовой момент наименее устойчивого КТ колонны снизился на 48 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Куляшов А.П., Тютнев И.А. Нагрузки, действующие на трубоукладчики при выполнении технологического процесса // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2011. – № 1. – С. 148–152.
- Дудников Ю.В. Влияние надземных нагрузок на напряжённо-деформированное состояние подземного трубопровода // Межотраслевой журнал для главных специалистов предприятий «Химическая техника». – 2006. – № 9. – С. 42–43.
- Петров И.П., Калосин К.И. Расстановка механизмов и выбор типа трубоукладчиков при производстве изоляционно-укладочных работ на трубопроводах большого диаметра // Труды ВНИИСТ. – 1968. – Вып. 15. – С. 86–90.
- Федоров В.М. Динамика передвижения строительно-монтажных гусеничных кранов с грузом на крюке: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1976. – 210 с.
- Хомиченко С.А. Разработка методов укладки магистральных газопроводов в условиях Заполярья: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2007. – 164 с.
- Тихонов Ю.Б. Повышение устойчивости изоляционно-укладочной колонны путем совершенствования систем управления кранами-трубоукладчиками: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2003. – 199 с.
- Строительство магистральных трубопроводов: справочник / В.Г. Чирсков и др. – М.: Недра, 1991. – 474 с.
- Строительная, дорожная и специальная техника: краткий справочник / Н.А. Манаков, А.А. Глазов, А.В. Понкратов и др. – М.: АО «Профтехника», 1996. – 304 с.
- Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. – М.: НПО ОБТ, 1993. – 245 с.
- РД 50–233–81. Методические указания: надежность в технике. Оценка параметров безопасности колесных и гусеничных машин по опрокидыванию. Характеристики статической и динамической устойчивости. – М.: Изд-во Стандартов, 1981. – 63 с.
- Раац В.Ф. Повышение грузовой устойчивости трубоукладчиков // Гидропривод и системы управления строительных и дорожных машин. – Омск: ОмПИ, 1987. – С. 62–66.
- Корытов М.С., Манник П.Ю. Метод составления уравнений динамики для исследования движения подъемно-транспортных машин в больших перемещениях // Дорожные и строительные машины (исследование, испытание и расчет): Сб. науч. тр. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2001. – Вып. 4. – Ч. 4. – С. 72–79.
- Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора: пер. с англ. – М.: Наука, 1976. – 104 с.
- Щербаков В.С., Корытов М.С., Шабалин А.Н. Совершенствование методов управления машинными комплексами, обеспечивающих оптимизацию рабочего процесса трубоукладочной колонны // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 180–188.
- Шабалин А.Н. Математическое описание трубопровода для создания систем управления трубоукладочной колонной // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2012. – № 3. – С. 134–136.
- Петров И.П., Камерштейн А.Г., Долгов В.К. Расчет напорных стальных трубопроводов на прочность. – М.: Госстройиздат, 1955. – 166 с.
- Щербаков В.С., Корытов М.С., Шабалин А.Н. Алгоритм процесса управления положением крюковой обоймы грузоподъемного крана // Вестник СибАДИ. – 2013. – № 3. – С. 107–113.
- Alvin A. Modeling and Analysis of Hydraulic Load Sensing: PhD Thesis. – Parma, 2004. – 251 p.
- Mitrev R., Gruychev R., Pobegailo P. CAD/CAE investigation of a large hydraulic mining excavator // Machine design. – 2011. – V. 3. – № 1. – P. 17–22.
- Manfred H. Modeling, simulation and control design for large and heavy manipulators // Journal of Robotics and Autonomous Systems. – 1996. – № 19. – P. 167–177.
- Caso P., Anthony A., Rigosi M. Modeling of an Excavator System – Semi Empirical Hydraulic Pump Model // SAE Int. J. Commer. Veh. – 2011. – № 4 (1). – P. 242–255.
- Beater P., Otter M. Multi-Domain Simulation: Mechanics and Hydraulics of an Excavator // Proc. of the 3rd International Modelling Conference. – Linköping, November 3–4, 2003. – P. 331–340.

Поступила 29.06.2014 г.

UDC 621.86./87

DIRECTIONS IN DEVELOPING SAFETY THEORY OF WORKING PROCESS FOR A LOAD-LIFTING CARS SET OF A PIPE-LAYING COLUMN

Vitaly S. Shcherbakov,

Dr. Sc., the Siberian Automobile and Highway Academy, 5, Mira Avenue, Omsk,
644080, Russia. E-mail: sherbakov_vs@sibadi.org

Mikhail S. Korytov,

Dr. Sc., the Siberian Automobile and Highway Academy, 5, Mira Avenue, Omsk,
644080, Russia. E-mail: kms142@mail.ru

Andrey N. Shabalin,

the Siberian Automobile and Highway Academy, 5, Mira Avenue, Omsk,
644080, Russia. E-mail: andrei-shabalin@mail.ru

A large-scale program of designing and constructing transnational pipeline systems is implemented in modern Russia because of its unstable political relations with neighboring states. The main problem when laying pipeline in a trench is ensuring cargo stability of a set of pipe-laying column cars. There are some reasons of losing cargo stability by a pipe layer crane: 1. inexperienced drivers. They react to partial loss of cargo stability and unload excessively the car, overloading the next pipe-layer crane; 2. roughness of a microrelief. The conclusion can be drawn on designing a control unit for a pipe-laying column to solve the following problems: 1. prevention of emergencies in pipe-laying column operation; 2. simplification of a pipe-layer crane driver work; 3. reduction of pipeline self-oscillations; 4. equal load of all pipe layer cranes of a pipe-laying column.

The main aim of the study is to increase safety of a pipe-laying column operation; to prevent emergency.

The methods used in the study are based on the analysis and synthesis of the results received in the research; theoretical researches are based on mathematical analysis, methods of imitating modeling; pilot studies are based on use of the experiment planning theory and the methods of statistical data processing.

The results: Based on the example of a pipe-laying column the authors have studied the features of a load-lifting cars set operation to ensure safety of the works; have proposed the theoretical concept based on compensation of dynamic impacts on load-lifting equipment arising at operation; have designed the cars set control unit, providing cargo stability of a pipe-laying column. The paper introduces the perspective model of the pipe layer crane with the cargo moment stabilization device.

Key words:

Pipe-laying column, set of cars, pipe-layer crane, control system, stability moment, settlement scheme, uniform coordinates.

REFERENCES

1. Kulyashov A.P., Tyutnev I.A. Nagruzki, deystviyushchie na truboukladchiki pri vypolnenii tekhnologicheskogo protsessa [Loads effecting the pipe layer at the process]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva*, 2011, no. 1, pp. 148–152.
2. Dudnikov Yu.V. Vliyaniye nadzemnykh nagruzok na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye podzemnogo truboprovoda [Influence of above-ground loads on stress-strain behavior of underground pipeline]. *Mezhotraslevoy zhurnal dlya glavnykh spetsialistov predpriyatiy «Khimicheskaya tekhnika»*, 2006, no. 9, pp. 42–43.
3. Petrov I.P., Kaloshin K.I. Rasstanovka mekhanizmov i vybor tipa truboukladchikov pri proizvodstve izolyatsionno-ukladochnykh rabot na truboprovodakh bolshogo diametra [Mechanism arrangement and choice of pipe layers at pipe-laying at big-inch pipe-lines]. *Trudy VNIIST*, 1968, Iss. 15, pp. 86–90.
4. Fedorov V.M. *Dinamika peredvizheniya stroitelno-montaznykh gusenichnykh kranov s gruzom na kryuke. Dis. Kand. nauk* [Dynamics in movement of building and installation crawler cranes. Cand. Diss.]. Moscow, 1976. 210 p.
5. Khomichenko S.A. *Razrabotka metodov ukladki magistralnykh gazoprovodov v usloviyakh Zapolyarya. Dis. Kand. nauk* [Development of methods of installing main pipe-lines in polar regions. Cand. diss.]. Moscow, 2007. 164 p.
6. Tikhonov Yu.B. *Povyisheniye ustoychivosti izolyatsionno-ukladochnoy kolonny putem sovershenstvovaniya sistem upravleniya kranami-trboukladchikami. Dis. Kand. nauk* [Increasing stability of pipe-laying column improving the control systems of pipe layer cranes. Cand. Diss.]. Omsk, 2003. 199 p.
7. Chirskov V.G. *Stroitelstvo magistralnykh truboprovodov: spravochnik* [Installation of main pipelines: reference book]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 474 p.
8. Manakov N.A., Glazov A.A., Ponkratov A.V. *Stroitel'naya, dorozhnaya i spetsial'naya tekhnika: kratkiy spravochnik* [Civil, road and special machinery: brief reference book]. Moscow, Prof-tehnika Publ., 1996. 304 p.
9. *Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii gruzopodemnykh kranov* [Rules of arrangement and safety of lifting cranes]. Moscow, NPO OBT Publ., 1993. 245 p.
10. *RD 50–233–81. Metodicheskie ukazaniya: nadezhnost v tekhnike. Otsenka parametrov bezopasnosti kolesnykh i gusenichnykh mashin po oprokidyvaniyu. Kharakteristiki staticheskoy i dinamicheskoy ustoychivosti* [Methodical instructions: industrial product dependability. Estimation of rollover safety parameters for wheel and track vehicles. Characteristics of static and dynamic stability]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 1981. 63 p.
11. Raats V.F. *Povyisheniye gruzovoy ustoychivosti truboukladchikov* [Increasing stability under working conditions of pipe layers]. *Gidropriwod i sistemy upravleniya stroitelnykh i dorozhnykh mashin* [Hydraulic gear and control systems of building and road machines]. Omsk, OmPI, 1987. pp. 62–66.
12. Korytov M.S., Mannik P.Yu. *Metod sostavleniya uravneniy dinamiki dlya issledovaniya dvizheniya podmno-transportnykh mashin v bolshikh peremeshcheniyakh* [Method of dynamic equation generation for investigating movement of handling machine-

- ry in large displacements]. *Dorozhnyie i stroitelnyie mashiny (issledovanie, ispytanie i raschet): Sbornik nauchnykh trudov* [Road and civil machinery (investigation, tests and calculation)]. Omsk, SibADI publ., 2001. Iss. 4, Ch. 4, pp. 72–79.
13. Pol R. *Modelirovanie, planirovanie traektoriy i upravlenie dvizheniem robota-manipulyatora* [Modeling, trajectory planning and movement control of robot manipulator]. Translated from English. Moscow, Nauka Publ., 1976. 104 p.
14. Shcherbakov V.S., Korytov M.S., Shabalin A.N. Sovershenstvovanie metodov upravleniya mashinnymi kompleksami, obespechivayushchikh optimizatsiyu rabochego protsessa truboukladnoy kolonny [Improving the methods for controlling machine systems optimizing the operation process of pipe laying column]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 4 (28), pp. 180–188.
15. Shabalin A.N. Matematicheskoe opisanie truboprovoda dlya sozdaniya sistem upravleniya truboukladnoy kolonnoy [Mathematical description of pipe line for developing control systems of pipe laying column]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2012, no. 3, pp. 134–136.
16. Petrov I.P., Kamershteyn A.G., Dolgov V.K. *Raschet napornykh stalnykh truboprovodov na prochnost* [Strength design of pressure steel pipe lines]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1955. 166 p.
17. Shcherbakov V.S., Korytov M.S., Shabalin A.N. Algoritm protsessa upravleniya polozheniem kryukovoy oboymy gruzopodemnogo krana [Algorithm of a position control of hook block in lifting crane]. *Vestnik SibADI*, 2013, no. 3, pp. 107–113.
18. Alvin A. *Modeling and Analysis of Hydraulic Load Sensing: PhD Thesis*. Parma, 2004. 251 p.
19. Mitrev R., Gruychev R., Pobegailo P. CAD/CAE investigation of a large hydraulic mining excavator. *Machine design*, 2011, vol. 3, no. 1, pp. 17–22.
20. Manfred H. Modeling, simulation and control design for large and heavy manipulators. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 1996, no. 19, pp. 167–177.
21. Caso P., Anthony A., Rigosi M. Modeling of an Excavator System – Semi Empirical Hydraulic Pump Model. *SAE Int. J. Commercial Veh.*, 2011, no. 4 (1), pp. 242–255.
22. Beater P., Otter M. Multi-Domain Simulation: Mechanics and Hydraulics of an Excavator. *Proc. of the 3rd International Modelica Conference*. Linköping, November 3–4, 2003. pp. 331–340.

Received: 29 June 2014.