

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРАНА-МАНИПУЛЯТОРА

Т. В. Луцко, к.т.н, доцент; А. С. Исаев; А. В. Демченко; В. А. Кондаков

ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

Аннотация. В статье выполнен анализ кинематических параметров стрелового оборудования крана-манипулятора. В качестве объекта исследования принята шарнирно-сочлененная стрела крана-манипулятора с грузовым моментом $14,3 \text{ т}\times\text{м}$ ($140,3 \text{ кН}\times\text{м}$). Решена задача положения оголовка стрелового оборудования с грузозахватным приспособлением по заданным относительным перемещениям в кинематических парах. С помощью полученных аналитических зависимостей координат грузозахватного приспособления можно уточнить геометрические характеристики рабочей зоны крана-манипулятора. Для расширения функциональности крана рекомендуется установка поворотной люльки. Определены скорости движения оголовка стрелы при различных положениях крано-манипуляторной установки (КМУ) с двумя видами навесного оборудования: крюковой подвеской и поворотной люлькой. Обосновываются условия эксплуатации крана-манипулятора по скоростным параметрам для крюкового исполнения и исполнения с поворотной люлькой.

Ключевые слова: кинематика, кран-манипулятор, крюковая подвеска, люлька, скорость, стрела.



*Луцко
Татьяна Васильевна*



*Исаев
Артем Сергеевич*



*Демченко
Александр Викторович*



*Кондаков
Владислав Альбертович*

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

В процессе проектирования кранов-манипуляторов устанавливаются геометрические параметры и компоновочные схемы стрелового оборудования в соответствии с грузовысотными характеристиками. Для обоснования конструкторских решений кранов-манипуляторов рассчитывается кинематика, основанная на принципе обеспечения наикратчайших путей передачи нагрузок и симметричности нагружения системы [1].

Краны-манипуляторы могут иметь различное стреловое и навесное оборудование, позволяющее решать задачи любой сложности. В качестве навесного оборудования могут быть использованы крюковая подвеска, люлька, устройство разгрузки мусорных контейнеров, грейферные и бордюрные захваты, виллы для паллет и др. Все это говорит об основном направлении развития кранов-манипуляторов – расширении функциональных возможностей под определенные задачи эксплуатации. Разработка и модернизация рабочего оборудования непосредственно связаны с обоснованием его кинематических характеристик. Это подтверждает актуальность настоящих исследований в данном вопросе.

В последнее время одной из тенденций развития управления рабочим процессом строительной техники различного назначения с шарнирно-сочлененным рабочим оборудованием, в частности, одноковшовых экскаваторов, автогидроподъемников, манипуляторов, является их роботизация. В связи с этим результаты настоящих исследований могут быть использованы не только для корректировки конструкторских разработок, но и для проектирования систем управления манипулятором [2 – 5].

В настоящей работе целью исследования является решение прямой задачи кинематического анализа стрелового оборудования крана-манипулятора. В частности, определяется положение оголовка стрелы с разными видами навесного оборудования в неподвижной системе координат, а также его абсолютная линейная скорость при заданных законах изменения обобщенных координат.

Решение этой задачи позволяет построить рабочую зону крано-манипуляторной установки (КМУ), а, следовательно, уточнить грузовысотные характеристики крана. Кинематические характеристики связаны с прочностными расчетами и непосредственно с конструированием стрелы, а также необходимы для исследования динамики КМУ.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В качестве объекта исследования принята шарнирно-сочлененная стрела крана-манипулятора INMAN IM 150N с грузовым моментом 14,3 т·м (140,3 кН·м) (является аналогом шарнирно-сочлененной КМУ австрийского производства PALFINGER PK 15500) [6]. На рисунке 1 а) представлена схема с указанием направлений рабочих движений крано-манипуляторной установки крана INMAN IM 150N, а его грузовой характеристика показана на рисунке 1 б). Предлагается установить дополнительное навесное оборудование – поворотную люльку (угол поворота в плане $2 \cdot 90^\circ$), закрепленную с помощью тросов к оголовку телескопической стрелы. На рисунке 2 а) представлена схема с указанием рабочих движений КМУ с поворотной люлькой, а на рисунке 2 б) – грузовой характеристика. Условия устойчивости в этом случае выполняются, поскольку грузоподъемность люльки 250 кг, а длина тросов для закрепления люльки небольшая – 1,5 м, при этом не только повышается функциональность крана, но и расширяется зона обслуживания КМУ.

Крано-манипуляторная установка рассматривается как система абсолютно твердых тел (звеньев), соединенных шарнирами. Примем расчетные кинематические схемы стрелового оборудования с двумя видами навесного оборудования (крюк и люлька), изображенные на рисунке 3, причем в расчетной схеме гидроцилиндры не указываются.

На рисунке 3 а) обозначено: l_1 – длина колонны OA; l_2 – длина корневой секции стрелы AB; l_3 – длина телескопических секций стрелы BC; т. О – точка закрепления колонны; т. А – точка закрепления стрелового оборудования; т. В – шарнир между корневой секцией стрелы и телескопическими секциями; т. С – оголовок стрелы, в рассматриваемом случае – шарнир закрепления крюковой подвески.

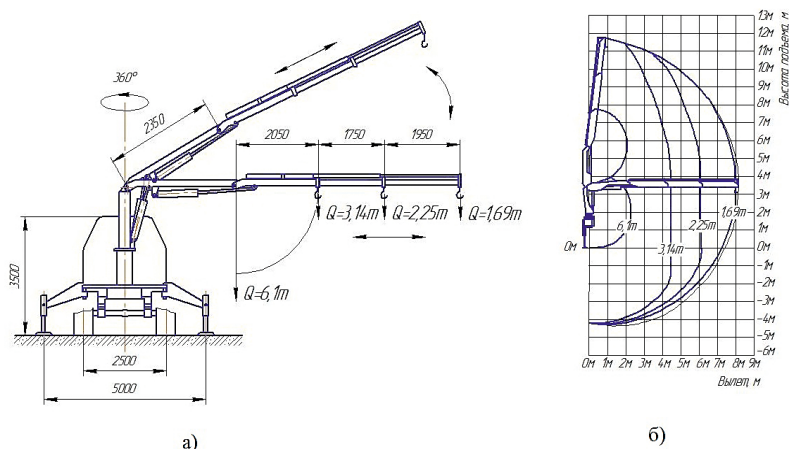


Рис. 1. Кран-манипулятор INMAN IM 150N с крюковой подвеской:

а) – схема крана; б) – грузовой характеристика

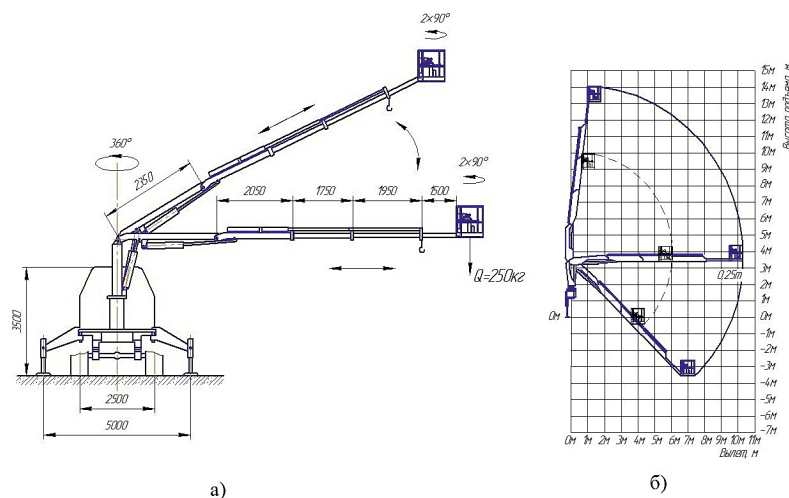


Рис. 2. Кран-манипулятор INMAN IM 150N с поворотной люлькой:

а) – схема крана; б) – грузовой характеристика

На рисунке 3 б) показана схема КМУ с поворотной люлькой, где приняты обозначения аналогичны рисунку 3 а), но добавлено следующее: l_3 – длина телескопических секций стрелы и тросов закрепления люльки, т. D – центр тяжести люльки; l_4 – плечо до центра тяжести люльки CD.

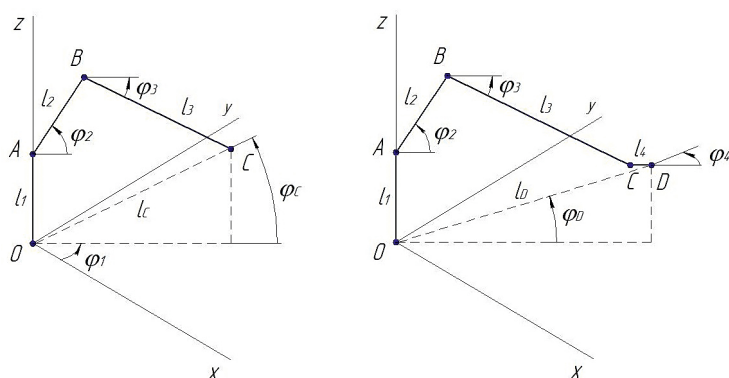


Рис. 3. Расчетная схема крано-манипуляторной установки с шарнирно-сочлененной стрелой (без учета телескопирования стрелы):

а) – с крюковой подвеской; б) – с поворотной люлькой

Рассмотрим два варианта: I вариант – не учитывается скорость телескопирования стрелы; II вариант – учитывается скорость телескопирования стрелы.

Для I варианта в качестве обобщенных координат приняты: φ_1 – угол поворота колонны; φ_2 – угол, определяющий положение корневой секции стрелы (то есть угол наклона корневой секции стрелы относительно горизонтальной плоскости); φ_3 – угол, определяющий положение телескопических секций стрелы (то есть угол наклона телескопических секций стрелы относительно горизонтальной плоскости); φ_4 – угол поворота люльки (причем, поворот люльки принимается возможным, когда колонна не вращается). Таким образом, для I варианта в расчетных схемах КМУ все степени подвижности вращательные.

Для схемы, представленной на рисунке 3 а), обобщенные координаты: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$.

Для схемы, представленной на рисунке 3 б), на которой учитывается поворот люльки, обобщенные координаты: $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$.

Координаты оголовка стрелы т. С для крюкового исполнения (рисунок 3 а) определяются по формулам:

$$\begin{cases} x_C = [l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos \varphi_3] \cos \varphi_1; \\ y_C = [l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos \varphi_3] \sin \varphi_1; \\ z_C = l_1 + l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin \varphi_3. \end{cases} \quad (1)$$

Координаты оголовка стрелы т. С, определяющие траекторию перемещения груза:

$$l_C(t) = \sqrt{x_C^2 + y_C^2 + z_C^2} = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) + 2l_1l_2 \sin \varphi_2 + 2l_1l_3 \sin \varphi_3}; \quad (2)$$

$$\varphi_C(t) = \arccos \frac{l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos \varphi_3}{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) + 2l_1l_2 \sin \varphi_2 + 2l_1l_3 \sin \varphi_3}}. \quad (3)$$

Полученные зависимости координат (2) и (3) позволяют построить зону обслуживания и в дальнейшем уточнить грузовысотные характеристики КМУ в крюковом исполнении с учетом упругости звеньев.

Абсолютная скорость оголовка стрелы т. С в исполнении крана с крюковой подвеской:

$$\begin{aligned} V_C &= \sqrt{V_{\varphi_1}^2 + V_{\varphi_2}^2 + V_{\varphi_3}^2} = \\ &= \sqrt{(l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos \varphi_3)^2 \cdot \dot{\varphi}_1^2 + l_2^2 \cdot \dot{\varphi}_2^2 + l_3^2 \cdot \dot{\varphi}_3^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Поскольку на данном этапе исследования не проводится анализ ускорений стрелового оборудования, ограничимся анализом определения координат и скоростей рабочих движений.

Пусть углы подъема корневой и телескопических секций стрелы одинаковые, то есть $\varphi_2 = \varphi_3$ и диапазон изменения этих углов составляет в соответствии с грузовысотными характеристиками от 0 до 83° (рисунки 1 б) и 2 б)). Рассмотрим, как изменяется скорость оголовка стрелы V_C при изменении угловой скорости поворота крана φ_1 (0...0,16 с⁻¹) и угловой скорости подъема стрелового оборудования φ_2 (0...0,096 с⁻¹) (рис. 4). Причем, для рассматриваемого крана максимальное значение угловой скорости $\varphi_2 = 0,048$ с⁻¹ (соответствует времени полного изменения вылета стрелы 30 с). Увеличим значение φ_2 до 0,096 с⁻¹ (времени полного изменения вылета стрелы 15 с). Частота вращения рассматриваемого крана 1 об/мин ($\varphi_1 = 0,105$ с⁻¹), увеличим частоту до 1,5 об/мин ($\varphi_1 = 0,16$ с⁻¹).

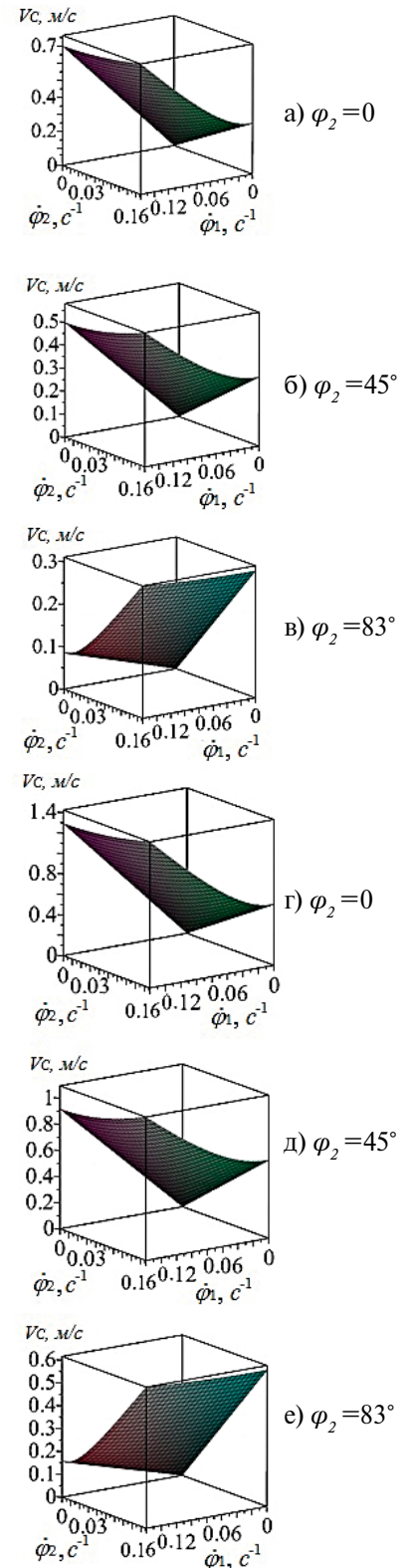


Рис. 4. Графики зависимости скорости оголовка стрелы V_C от угловой скорости поворота крана φ_1 и угловой скорости подъема корневой и телескопических секций стрелы φ_2 ; а), б), в) – при длине телескопической стрелы $l_3 = 2,05$ м; г), д), е) – при длине телескопической стрелы $l_3 = 5,75$ м

Анализ графиков, представленных на рисунке 4, показал, что наибольшее влияние на абсолютную скорость оголовка стрелы V_C оказывает угловая скорость поворота крана φ_1 , угол наклона стрелового оборудования φ_2 и длина телескопической стрелы, кроме положения стрелы с углом наклона $\varphi_2 = 83^\circ$. В последнем случае на скорость оголовка стрелы V_C большее влияние оказывает скорость φ_2 , а частота вращения практически не влияет; причем, скорость V_C получается по сравнению с другими положениями стрелы меньше: при длине телескопической стрелы 2,05 м $V_C = 0,31$ м/с, а при длине стрелы 5,75 м $V_C = 0,62$ м/с.

Максимальные значения скорости оголовка стрелы в крюковом исполнении возникают при горизонтальной стреле ($\varphi_2 = 0$) и составляют: $V_C = 0,76$ м/с при длине телескопической стрелы 2,05 м и $V_C = 1,43$ м/с при длине телескопической стрелы 5,75 м (при этом частота вращения крана 1,5 об/мин, что соответствует угловой скорости поворота крана $\varphi_1 = 0,16$ с⁻¹). Полученные значения V_C являются завышенными, поэтому не рекомендуется при стреле 5,75 м увеличение частоты вращения крана до 1,5 об/мин.

В рассматриваемом кране угловая скорость поворота 0,105 с⁻¹ (частота вращения 1 об/мин), угловая скорость подъема стрелового оборудования 0,048 с⁻¹ (соответствует времени полного изменения вылета 30 с). Для таких данных наибольшая скорость оголовка стрелы при максимальной длине телескопической стрелы 5,75 м составила $V_C = 0,9$ м/с (угол $\varphi_2 = 0$) и $V_C = 0,32$ м/с (угол $\varphi_2 = 83^\circ$). Поэтому при исполнении крана с люлькой и совмещении движений поворота и подъема полностью телескопически выдвинутой стрелы не рекомендуется осуществлять поворот с частотой вращения 1 об/мин (0,105 с⁻¹). В этом случае рекомендуется снизить частоту вращения крана до 0,6 об/мин (0,063 с⁻¹), тогда скорость оголовка стрелы не будет превышать $V_C = 0,59$ м/с.

Координаты центра тяжести люльки т. D (поворот люльки возможен только при отсутствии вращения КМУ) (рис. 3 б)) определяются по формуле:

$$\left. \begin{aligned} x_D &= l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos \varphi_3 + l_4 \cos \varphi_4; \\ y_D &= l_4 \sin \varphi_4; \\ z_D &= l_1 + l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin \varphi_3. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Координаты т. D, которые определяют траекторию перемещения люльки:

$$l_D(t) = \sqrt{x_D^2 + y_D^2 + z_D^2} = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + l_4^2 + 2l_2l_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) + 2l_2l_4 \cos \varphi_2 \cos \varphi_4 + 2l_3l_4 \cos \varphi_3 \cos \varphi_4 + 2l_1l_2 \sin \varphi_2 + 2l_1l_3 \sin \varphi_3}; \quad (6)$$

$$\varphi_D(t) = \arcsin \frac{z_D}{l_D(t)} = \frac{l_1 + l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin \varphi_3}{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + l_4^2 + 2l_2l_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) + 2l_2l_4 \cos \varphi_2 \cos \varphi_4 + 2l_3l_4 \cos \varphi_3 \cos \varphi_4 + 2l_1l_2 \sin \varphi_2 + 2l_1l_3 \sin \varphi_3}}. \quad (7)$$

Полученные зависимости координат люльки (6) и (7) позволяют построить зону обслуживания и в дальнейшем уточнить грузовысотные характеристики КМУ в исполнении с поворотной люлькой и учетом упругости звеньев.

Абсолютная скорость люльки т. D:

$$V_D = \sqrt{V_{\varphi_2}^2 + V_{\varphi_3}^2 + V_{\varphi_4}^2} = \sqrt{l_2^2 \cdot \dot{\varphi}_2^2 + l_3^2 \cdot \dot{\varphi}_3^2 + l_4^2 \cdot \dot{\varphi}_4^2}. \quad (8)$$

Примем, что угловые скорости подъема корневой и телескопической стрел равными $\varphi_2 = \varphi_3$. Рассмотрим зависимость скорости движения люльки V_D от одновременного изменения угловой скорости поворота люльки φ_4 (0...0,3 с⁻¹) и угловой скорости подъема стрелового оборудования (0...0,096 с⁻¹) (рис. 5).

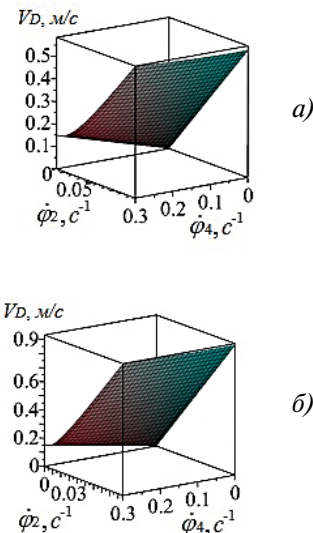


Рис. 5. Графики зависимости скорости люльки V_D от угловой скорости подъема корневой и телескопических секций стрелы φ_2 и угловой скорости поворота люльки φ_4 :

а) – при длине телескопической стрелы и тяг закрепления люльки $l_3 = 3,55$ м;

б) – при длине телескопической стрелы и тяг закрепления люльки $l_3 = 7,25$ м

Согласно полученным результатам скорость движения люльки V_D не зависит от угла наклона стрелового оборудования и практически не зависит от угловой скорости поворота люльки φ_4 . В основном скорость движения люльки V_D зависит от угловой скорости подъема стрелового оборудования φ_2 и от длины телескопической стрелы. Максимальная скорость движения люльки составила при угловой скорости подъема стрелы 0,096 с⁻¹: $V_D = 0,93$ м/с (при телескопической стреле 5,75 м и тягах 1,5 м); $V_D = 0,58$ м/с (при телескопической стреле 2,05 м и тягах 1,5 м). Данные значения скорости V_D получились завышенными для подъемников [7, 8], поэтому не рекомендуется увеличивать скорость подъема стрелы до 0,096 с⁻¹.

В рассматриваемом кране угловая скорость подъема стрелового оборудования 0,048 с⁻¹ (соответствует времени полного изменения вылета 30 с). В этом случае скорость люльки при максимальной длине телескопической стрелы 5,75 м и тягах 1,5 м составила $V_D = 0,48$ м/с, а при стреле 2,05 м и тягах 1,5 м –

$V_D = 0,32$ м/с. Что для условий эксплуатации подъемников является удовлетворительным [7, 8], поэтому можно рекомендовать на кране INMAN IM 150N установку люльки, но при этом не превышать значения угловой скорости подъема стрелового оборудования выше $0,048$ с⁻¹.

Далее рассмотрим II вариант работы КМУ, когда учитывается скорость телескопирования стрелы.

Для II варианта в расчетных схемах крано-манипуляторной установки две степени подвижности вращательные и одна поступательная:

– для схемы, представленной на рисунке 6 а), обобщенные координаты: φ_1, φ_2, l ;

– для схемы, представленной на рисунке 6 б), на которой учитывается поворот люльки, обобщенные координаты: φ_2, φ_4, l .

Примем обозначение l общей длины корневой секции стрелы и выдвигаемых секций телескопической стрелы, а в случае исполнения с люлькой еще включаем длины тяг.

Координаты оголовка стрелы т. С для крюкового исполнения (рис. 6, а) с учетом телескопирования стрелы определяются по формуле:

$$\left. \begin{aligned} x_C &= l \cos \varphi_1 \cos \varphi_2; \\ y_C &= l \sin \varphi_1 \cos \varphi_2; \\ z_C &= l_1 + l \sin \varphi_2. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Абсолютная скорость оголовка т. С (крюковой подвески) с учетом телескопирования стрелы:

$$V_C = \sqrt{V_l^2 + V_{\varphi_1}^2 + V_{\varphi_2}^2} = \sqrt{\dot{l}^2 + l^2 \cdot \cos^2 \varphi_2 \cdot \dot{\varphi}_1^2 + l^2 \cdot \dot{\varphi}_2^2}. \quad (10)$$

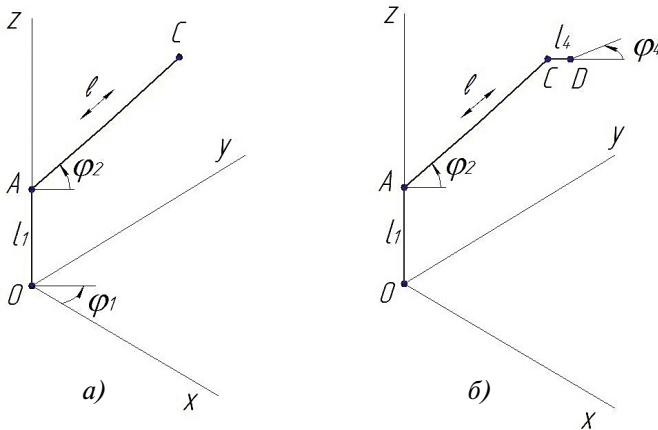


Рис. 6. Расчетная схема крано-манипуляторной установки с шарнирно-сочлененной стрелой (с учетом телескопирования стрелы):

- а) – с крюковой подвеской;
- б) – с поворотной люлькой

На рисунке 7 представлены графики зависимости скорости V_C от угловой скорости поворота φ_1 и скорости телескопирования l , при этом угловую скорость подъема стрелы принимаем постоянной $\varphi_2 = 0,048$ с⁻¹. Диапазон изменения скоростей: $\varphi_1 = 0 \dots 0,16$ с⁻¹,

$l = 0 \dots 0,2$ м/с ($0,2$ м/с соответствует времени телескопирования 20 с). Стрела телескопически выдвигается на полную длину. Полученные результаты показали, что наибольшая скорость оголовка стрелы $V_C = 1,37$ м/с возникает при максимальной частоте вращения крана $\varphi_1 = 0,16$ с⁻¹ и горизонтальной стреле, причем скорость телескопирования практически не влияет, кроме минимального вылета стрелы, для которого угол наклона стрелы $\varphi_2 = 83^\circ$. В последнем случае наибольшее значение скорости $V_C = 0,46$ м/с, что в три раза меньше по сравнению с горизонтальной стрелой. В рассматриваемом кране угловая скорость поворота $\varphi_1 = 0,105$ с⁻¹ (частота вращения 1 об/мин), для которой скорость оголовка стрелы $V_C = 0,95$ м/с при горизонтальной полностью выдвинутой стреле. Поэтому в случае оснащения крана люлькой необходимо снизить частоту вращения крана до $0,6$ об/мин ($\varphi_1 = 0,063$ с⁻¹) и снизить угловую скорость подъема стрелы до $\varphi_2 = 0,036$ с⁻¹ (соответствует времени полного изменения вылета стрелы 40 с), что обеспечит скорость оголовка стрелы, не превышающую значение $V_C = 0,6$ м/с.

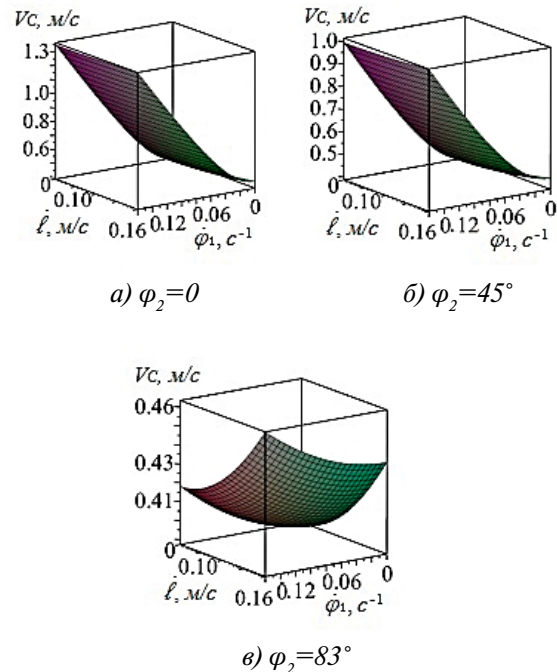


Рис. 7. Графики зависимости скорости V_C от угловой скорости поворота крана φ_1 и скорости телескопирования l

Координаты центра тяжести люльки т. D (рис. 6б) с учетом телескопирования стрелы (кран в этом случае не вращается, а только осуществляется поворот люльки):

$$\left. \begin{aligned} x_D &= l \cos \varphi_2 + l_4 \cos \varphi_4; \\ y_D &= l_4 \sin \varphi_4; \\ z_D &= l_1 + l \sin \varphi_2. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Абсолютная скорость люльки т. D с учетом телескопирования стрелы:

$$V_D = \sqrt{V_{\varphi_2}^2 + V_l^2 + V_{\varphi_4}^2} = \sqrt{l^2 \cdot \dot{\varphi}_2^2 + \dot{l}^2 + l_4^2 \cdot \dot{\varphi}_4^2}. \quad (12)$$

На рис. 8 а) представлен график зависимости скорости люльки V_D от угловой скорости подъема стрелы φ_2 и скорости телескопирования l , при этом угловую скорость поворота люльки принимаем постоянной $\varphi_4 = 0,3 \text{ с}^{-1}$. Диапазон изменения скоростей: $l = 0 \dots 0,2 \text{ м/с}$, $\varphi_2 = 0 \dots 0,048 \text{ с}^{-1}$. Полученный график показал, что угловая скорость подъема стрелы φ_2 существенно влияет на скорость люльки V_D , а скорость телескопирования незначительно влияет на скорость люльки V_D . Максимальное значение скорости люльки составило $V_D = 0,52 \text{ м/с}$ при угловой скорости $\varphi_2 = 0,048 \text{ с}^{-1}$ и скорости телескопирования $0,2 \text{ м/с}$.

На рисунке 8 б) представлен график зависимости скорости люльки V_D от угловой скорости поворота люльки φ_4 и скорости телескопирования l , при этом угловую скорость подъема стрелы принимаем постоянной $\varphi_2 = 0,048 \text{ с}^{-1}$. Диапазон изменения скоростей: $l = 0 \dots 0,2 \text{ м/с}$, $\varphi_4 = 0 \dots 0,3 \text{ с}^{-1}$. Данный график показал, что скорость телескопирования l и угловая скорость поворота люльки φ_4 существенно влияют на скорость люльки V_D . Максимальное значение скорости люльки составило $V_D = 0,52 \text{ м/с}$ при угловой скорости поворота люльки $\varphi_4 = 0,3 \text{ с}^{-1}$ и скорости телескопирования $0,2 \text{ м/с}$. Полученные данные скорости люльки V_D удовлетворяют условиям эксплуатации подъемников [7, 8].

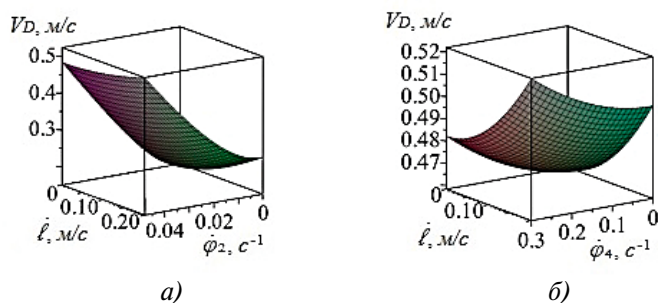


Рис. 8. Графики зависимости скорости люльки V_D от скорости телескопирования l угловой скорости подъема стрелы φ_2 (а) и от угловой скорости поворота люльки φ_4 (б)

ВЫВОДЫ:

1. Выполнен кинематический анализ шарнирно-сочлененной стрелы крана-манипулятора в двух исполнениях: с крюковой подвеской и с поворотной люлькой.

2. Полученные аналитические зависимости позволяют на этапе проектирования крана моделировать зону обслуживания крана, корректировать грузовысотные характеристики и прогнозировать

скоростные параметры рабочих движений крано-манипуляторной установки.

3. Определены скорость оголовка стрелы крана в крюковом исполнении и с поворотной люлькой. Установлено, что наибольшее влияние на скорость грузозахватных приспособлений имеет частота вращения крана, которую рекомендуется не превышать более 1 об/мин в случае исполнения с крюковой подвеской.

4. Рекомендуется установка на кране INMAN IM 150N поворотной люльки, но при этом в целях снижения динамических нагрузок необходимо не превышать скорость оголовка стрелы выше 0,6 м/с. Для этого при совмещении движений поворота и подъема полностью выдвинутой телескопической стрелы следует снизить частоту вращения крана до 0,6 об/мин и угловую скорость подъема стрелы до 0,036 с⁻¹.

Список литературы

1. Петренко, А. М. Грузовые манипуляторы специальных транспортных средств: учебное пособие / А. М. Петренко; А. Т. Зевков. – Москва: МАДИ(ГТУ), 2009. – 90 с. – Текст : непосредственный.
2. Бурдаков, С. Ф. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов : учебное пособие для студ. вузов, обучающихся по спец. «Робототехнические системы» / С. Ф. Бурдаков, В. А. Дьяченко, А. Н. Тимофеев. – Москва: Высшая школа, 1986. – 264 с.: ил. – Текст : непосредственный.
3. Зенкевич, С. Л. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 400 с., ил. – ISBN 5-7038-1339-5. – Текст : непосредственный.
4. Ha Q.P. A Control Architecture for Robotic Excavation in Construction / Q.P. Ha. – Text : direct // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. – Vol. 19. – 2004. – P. 28–41.
5. Nielsen, J. On the Kinematic Analysis of Robotic Mechanisms / James Nielsen, Bernard Roth. – Text : direct // The International Journal of Robotics Research. – Vol. 18. – No. 12. – 1999. – P. 1147–1160.
6. PALFINGER AG: Loader Cranes : [website]. – Text : electronic. – URL : <https://www.palfinger.com/en> (date of application: 10.05.2023).
7. Автомобильные подъемники и вышки: Каталог. – Москва: Проектно-конструкторский и технологический институт промышленного строительства ОАО ПКТИ-промстрой, 2001. – 87 с. – Текст : непосредственный.
8. Bronto Skylift Access Products: Aerial work platforms : [website]. – Text : electronic. – URL : <https://brontoskylift.com/access-aerial-platforms/> (date of application: 10.05.2023).