

- в процессе эксперимента установлено, что агротехнические требования, предъявляемые к культивации по устойчивости движения рабочего органа в случае использования резонансного режима полностью выполняются; экспериментально подтверждено лучшее качество крошения почвенного пласта;
- в целом резонансный режим работы, положительно сказываясь на энергетических затратах на обработку почвы, существенно влияет на устойчивость почвенного фона к ветровой эрозии, особенно сильно это проявляется на почвах, обладающих слабыми диссипативными свойствами. Поэтому при оптимизации упругих связей культиваторного МТА должны учитываться экологические аспекты взаимодействия рабочего органа с почвой с целью сохранения её плодородной структуры.

### Литература

1. Кузнецов Н.Г. О проблемах использования сельскохозяйственных машин с упругим креплением рабочих органов [Текст] / Н.Г. Кузнецов, Д.С. Гапич, Е.А. Назаров // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2010. №1 – С. 132-135.
2. Патент РФ №146230 Рабочий орган почвообрабатывающего орудия с изменяемой частотой собственных колебаний / Гапич Д.С., Денисова О.А. / ФГБОУ ВО Волгоградский государственный аграрный университет. – № 201422228. Заявл. 30.05.2015; Опубл. 03.09.2014г.
3. Кузнецов Н.Г. Математическая модель генерации автоколебаний рабочего органа культиватора BOURGAULT 8810 [Текст] / Н.Г. Кузнецов, Д.С. Гапич, Е.А. Назаров // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2011. №4 – С. 203-209.
4. Гапич Д.С. Экологические особенности использования резонансных режимов работы рабочих органов культиваторного машинно-тракторного агрегата [Текст] / Д.С. Гапич, О.А. Денисова // Научное обозрение. Саратов. – 2015. №10 – С. 40-43.

### **Влияние ветровых воздействий на нагруженность гидравлических крано-манипуляторных установок с шарнирно-сочлененными стрелами**

д.т.н. проф. Ковальский В.Ф., к.т.н. Лагерев И.А.

*Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ),  
Брянский государственный университет имени академика И.Г.Петровского  
8 (495) 684-22-08, kovalskij@miit.ru, 8 (4832) 64-81-17, lagerev-bgu@yandex.ru*

*Аннотация.* С использованием универсальных математических моделей исследования динамики гидравлического крана-манипулятора при движении звеньев стрелы проанализировано влияние интенсивности продольных и поперечных ветровых воздействий на его нагруженность. Показано, что ветровая нагрузка не только вызывает дополнительные механические напряжения в элементах конструкции, но также влияет на кинематические и динамические параметры движения звеньев шарнирно-сочлененной стрелы крана-манипулятора.

*Ключевые слова:* установка крано-манипуляторная, кран-манипулятор, ветровое воздействие, динамика, нагруженность, моделирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых-кандидатов наук № МК-92.2014.8.

Гидравлические крано-манипуляторные установки, смонтированные на подвижном шасси различных транспортно-технологических машин, получили широкое распространение в различных отраслях экономики Российской Федерации. Они широко используются во всех регионах России, в том числе, в регионах с высоким ветровым давлением до 700... 1000 Па, т.е. в V-VII ветровых районах согласно СНиП 2.01.07 (горные районы Кавказа, Средней Азии и Сибири, северное и северо-восточное побережье России). В этих условиях ветровая

нагрузка может вносить заметный вклад в нагруженность металлоконструкции кранов-манипуляторов и оказывать влияние на кинематические и динамические параметры перемещения груза шарнирно-сочлененными стрелами в процессе выполнения погрузочно-разгрузочных и иных видов работ [1].

Для оценки степени влияния интенсивности и направления воздействия ветровой нагрузки на количественные характеристики работы крано-манипуляторных установок с шарнирно-сочлененными грузоподъемными стрелами, состоящими из последовательно соединенных подвижных звеньев, целесообразно использовать методики кинематического и динамического анализа, предложенные в работах [2–5].

Если известны линейная  $\vec{v}_3$  и угловая  $\vec{\omega}_3$  скорости, а также линейное  $\vec{a}_3$  и угловое  $\vec{\varepsilon}_3$  ускорения в начале отсчета звена шарнирно-сочлененной грузовой стрелы крано-манипулятора, то в произвольной точке по длине звена эти величины могут быть найдены по следующим зависимостям:

$$\vec{v} = \vec{v}_3 + \vec{\omega}_3 \times \vec{r}; \quad (1)$$

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_3; \quad (2)$$

$$\vec{a} = \vec{a}_3 + \vec{\varepsilon}_3 \times \vec{r} + \vec{\omega}_3 \times (\vec{\omega}_3 \times \vec{r}); \quad (3)$$

$$\vec{\varepsilon} = \vec{\varepsilon}_3, \quad (4)$$

где:  $\vec{r}$  – вектор из начала координат звена до заданной точки;  $\vec{v}$ ,  $\vec{\omega}$ ,  $\vec{a}$ ,  $\vec{\varepsilon}$  – соответственно линейная и угловая скорости, линейное и угловое ускорения в заданной точке.

С помощью зависимостей (1) – (4) определяются скорости и ускорения в центре тяжести рассматриваемого звена, а также в точке крепления к этому звену шарнира, соединяющего рассматриваемое звено с последующим звеном.

Если система отсчета шарнира повернута относительно системы отсчета предыдущего звена, то переход между ними осуществляется с использованием матрицы поворота:

$$\vec{u}_u = R_u^T \vec{u}_3; \quad (5)$$

$$\vec{u}_3 = R_u \vec{u}_u,$$

где:  $\vec{u}_u$ ,  $\vec{u}_3$  – вектор, выраженный в системах отсчета шарнира и звена соответственно;

$R_u$  – матрица поворота из системы координат шарнира в систему координат звена.

По зависимостям (1) – (5) вычисляются линейная  $\vec{v}_u$  и угловая  $\vec{\omega}_u$  скорости, а также линейное  $\vec{a}_u$  и угловое  $\vec{\varepsilon}_u$  ускорения в начале отсчета шарнира.

По формулам (1) – (5) в алгоритме Ньютона-Эйлера осуществляется прямой ход. В основе обратного хода лежат следующие зависимости:

$$\sum \vec{F} = m \times \vec{a}_{um}; \quad (6)$$

$$\sum \vec{M} = J \times \vec{\varepsilon}_{um} + \vec{\omega}_{um} \times (J \times \vec{\omega}_{um}), \quad (7)$$

где:  $m$ ,  $J$  – масса и момент инерции звена стрелы крана-манипулятора;  $\vec{\omega}_{um}$ ,  $\vec{a}_{um}$ ,  $\vec{\varepsilon}_{um}$  – угловая скорость, линейное ускорение, угловое ускорение, вычисленные в центре тяжести звена;  $\sum F$ ,  $\sum \vec{M}$  – обусловленные действием внешних сил (в том числе и ветровой нагрузки) равнодействующие сила и момент, приведенные к центру тяжести звена [2; 4].

Из уравнений (6) и (7) вычисляются сила и момент, передаваемые через шарнир от одного звена крано-манипулятора к предыдущему. Неизвестные усилия привода  $\tau$  в шарнирах стрелы определяются с помощью проекции усилия в сочленении на ось шарнира.

Усилие гидроцилиндра прикладывается к звеньям стрелы крана-манипулятора. При расчете крано-манипуляторных установок с гидравлическим приводом перемещения звеньев стрелы следует учитывать, что скорость движения штока силового гидроцилиндра ограничена величиной подачи насоса, что позволяет моделировать возрастание сил сопротивления

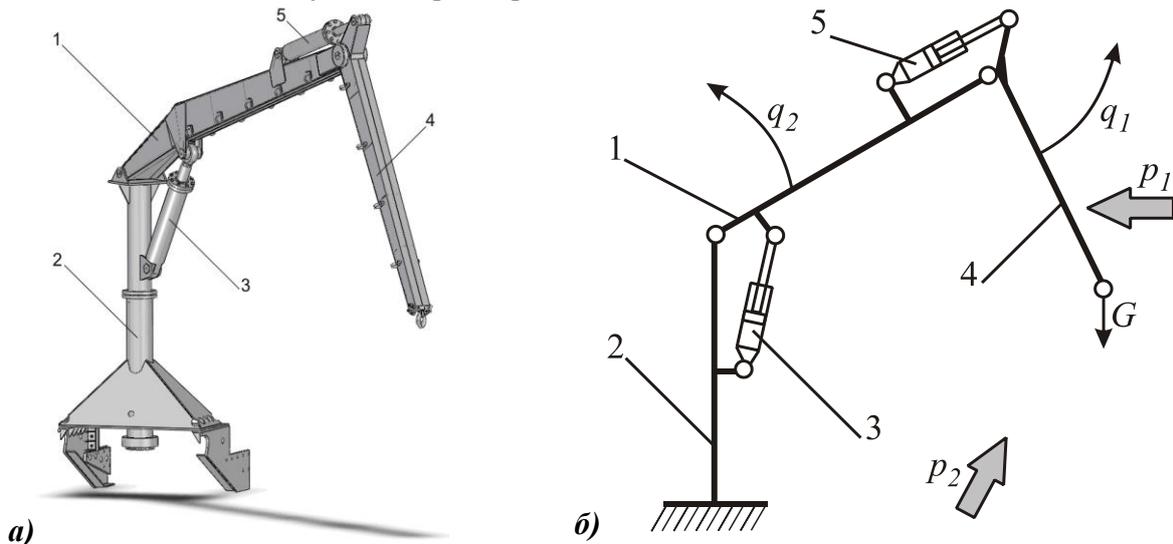
движению и падение скорости движения звена при воздействии сильного ветра:

$$v_{ш} < Q_n / S_{эф},$$

где:  $v_{ш}$ ,  $S_{эф}$  – скорость штока и эффективная площадь поверхности поршня гидроцилиндра;  
 $Q_n$  – подача (объемный расход) насоса [2], являющаяся его технической характеристикой.

В качестве примера использования предложенного алгоритма и оценки степени влияния интенсивности и направления воздействия ветровой нагрузки на нагруженность металлоконструкции шарнирно-сочлененной грузоподъемной стрелы был выполнен расчет крана-манипулятора транспортной машины АСТ-4-А (рисунок 1а), используемой при прокладке магистральных газо- и нефтепроводов, при транспортировке номинального груза весом  $G$  и воздействии продольного ( $p_1$ ) и поперечного ( $p_2$ ) ветра с давлением 0, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 Па. Давление в 1000 Па можно считать предельным для реальных условий эксплуатации манипуляторов на территории РФ, однако, для наглядности проведены расчеты для больших значений.

Расчетная схема исследуемого крана-манипулятора (рисунок 1б) является разомкнутой, не имеет ответвлений, замкнутых контуров и дублирования. При проведении моделирования было принято, что грузоподъемная машина установлена на абсолютно жестком неподвижном основании. На практике, базовое шасси машины оказывает определенное влияние на динамику крана-манипулятора [6], однако для сравнительных расчетов напряженно-деформированного состояния при разной интенсивности и направлении ветровой нагрузки податливостью шасси допустимо пренебречь.



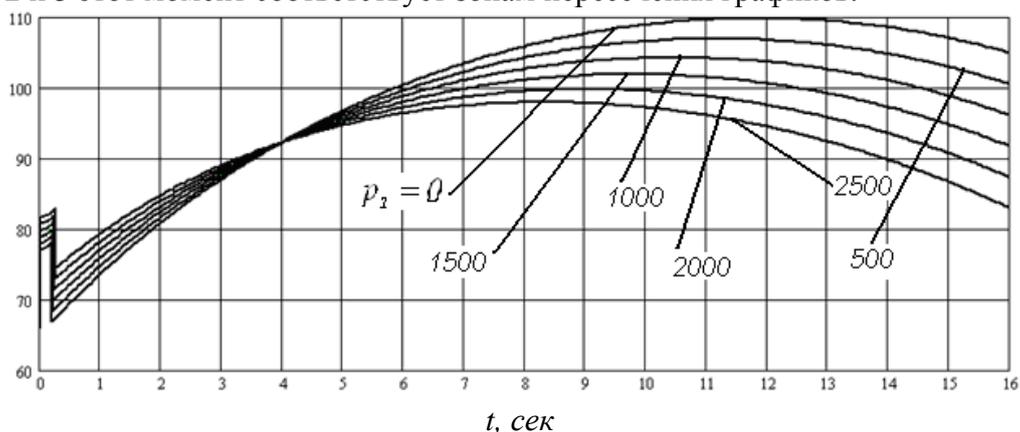
**Рисунок 1. Исследуемый кран-манипулятор: а – трехмерная модель; б – расчетная схема; 1 – стрела; 2 – поворотная колонна; 3 – нижний гидроцилиндр; 4 – рукоять; 5 – верхний гидроцилиндр**

Для моделирования использовался разработанный программный комплекс численного расчета манипуляционных систем [7]. Внешние нагрузки, вызванные воздействием ветра, определялись по заложенному алгоритму [3, 5], использующему трехмерную модель конструкции крана-манипулятора для вычисления площади, на которую воздействует заданное ветровое давление.

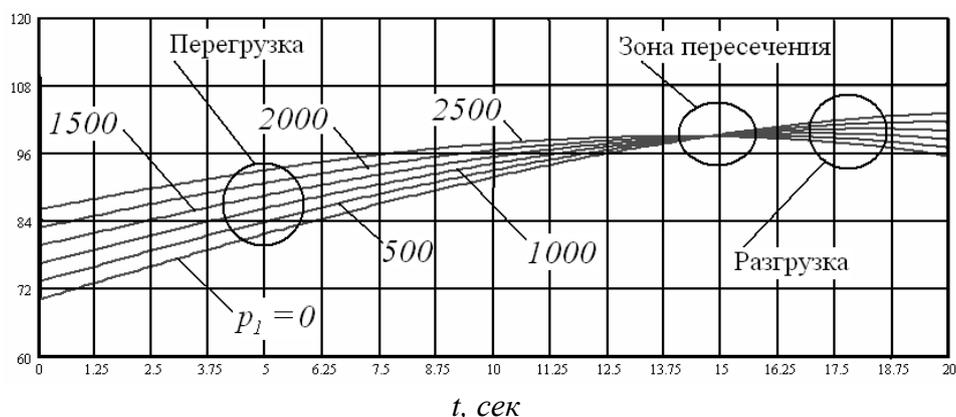
На основании выполненных расчетов построены графики изменения в процессе движения максимальных напряжений в стреле и рукояти крана-манипулятора при воздействии продольного ветра, показанные на рисунках 2 и 3.

В зависимости от положения звена стрелы продольная ветровая нагрузка может создавать как дополнительные механические напряжения, так и частично разгружать конструкцию. При расположении звена по направлению ветра (параллельно направлению движения воздуха) продольная ветровая нагрузка практически не оказывает влияние на напряженное

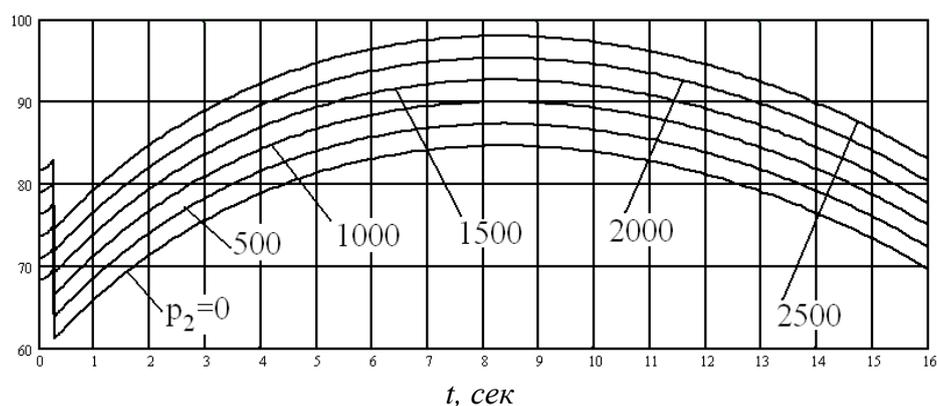
состояние звена, так как вызывает только сжимающие напряжения, которые значительно меньше изгибных напряжений из-за воздействия дополнительного изгибающего момента. На рисунках 2 и 3 этот момент соответствует зонам пересечения графиков.



**Рисунок 2. Напряжения в наиболее опасном сечении рукоятки крана-манипулятора при различном продольном ветровом давлении  $p_1$ , МПа**



**Рисунок 3. Напряжения в наиболее опасном сечении стрелы крана-манипулятора при различном продольном ветровом давлении  $p_1$ , МПа**



**Рисунок 4. Напряжения в наиболее опасном сечении стрелы крана-манипулятора при различном поперечном ветровом давлении  $p_2$ , МПа**

Продольная ветровая нагрузка также влияет на скорость движения звена стрелы крана-манипулятора, так как лежит в той же плоскости, что и движущее усилие гидропривода. Чем выше продольная скорость ветра, тем оказывается больше продолжительность цикла работы крана-манипулятора по отработке требуемого движения груза за счет увеличения сопротивления движению. Однако при достаточном запасе мощности силового гидроцилиндра и достаточной подаче в него рабочей жидкости насосной установкой машины уменьшение скорости движения не превышает 0,5%. Для выработки рекомендаций по повышению производительности работы крана в условиях значительных ветровых нагрузок необходимо прове-

сти в дальнейшем более детальный анализ этого явления.

На рисунке 4 показан график изменения максимальных напряжений в стреле при воздействии поперечного ветра. Качественная картина изменения максимальных напряжений в рукояти выглядит аналогично.

На графике видно, что поперечная ветровая нагрузка вызывает дополнительные механические напряжения в элементах конструкции. Величина этих напряжений растет с увеличением скорости ветра. Явление разгрузки металлоконструкции, как это имеет место при воздействии продольного ветра, отсутствует.

### Выводы

1. Ветровые нагрузки способны оказывать определенное влияние на уровень напряженного состояния металлоконструкций и количественные характеристики перемещения грузов шарнирно-сочлененными грузоподъемными стрелами гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных транспортно-технологических машин. При этом имеет значение не только интенсивность ветрового давления (скорость ветра), но и направление ветрового воздействия по отношению к плоскости расположения стрелы и перемещения груза.
2. При направлении ветра, продольном относительно плоскости стрелы крано-манипулятора, ветровое давление может оказывать двоякое действие: на отдельных временных интервалах в пределах цикла работы крана по отработке движения груза оно может приводить к повышению общего напряженного состояния в металлоконструкции звеньев стрелы, а на других – к снижению. Расчеты конкретного крана-манипулятора показали, что относительная величина такого отклонения уровня напряженного состояния может достигать 10...15%, причем она тем выше, чем выше ветровое давление.
3. При направлении ветра, поперечном относительно плоскости стрелы крано-манипулятора, ветровое давление обуславливает повышение уровня напряженного состояния в металлоконструкции звеньев шарнирно-сочлененной стрелы также приблизительно на 10...15%.

### Литература

1. Лагерев А.В. Нагруженность подъемно-транспортной техники. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2010. – 180 с.
2. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Мильто А.А. Универсальная методика динамического анализа гидравлических кранов-манипуляторов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 3. – С. 24–31.
3. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Мильто А.А. Универсальная методика определения напряжений в стержневых элементах конструкций гидравлических кранов-манипуляторов в задачах динамики // Вестник Брянского государственного университета. – 2013. – № 4. – С. 21–26.
4. Featherstone R. Rigid Body Dynamics Algorithms. – N.Y.: Springer, 2008. – 272 p.
5. Luh J.Y.S., Walker M.W., Paul R.P.C. On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 1980. – Vol. 102, № 2. – P. 69–76.
6. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Мильто А.А. Исследование динамики и прочности гидравлических крано-манипуляторных установок на подвижном шасси // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2015. – № 1. – С. 43–48.
7. Программный комплекс «Динамика крана-гидроманипулятора» / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011616816. – Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ (Роспатент) 02.11.11.