

ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВИБРАЦИИ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО РАБОЧЕГО ОРГАНА

**Владимир Васильевич Василенко
Дмитрий Николаевич Афоничев
Сергей Владимирович Василенко
Иван Юрьевич Тимофеев**

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Значительные энергетические затраты на глубокое рыхление почвы и поверхностную обработку можно сократить, используя вибрацию рабочих органов (колебания высокой частоты и малой амплитуды). Применение колебаний при обработке почвы – достаточно перспективный, но недостаточно исследованный процесс. Главная трудность теоретического исследования состоит в том, что почвы очень разнообразны по своим свойствам и представляют собой сложную вязкопластичную среду. Существует мнение, что вибрация снижает коэффициент трения почвы о рабочий орган, так как признано очевидным: при вибрации контактирующие поверхности на мгновения разъединяются, и материал какую-то часть пути пролетает над рабочим органом без трения. Эта точка зрения была положена в основу теоретических рассуждений с целью обоснования рационального направления колебаний рабочего органа при почвообработке. Логический анализ процесса вибрации рабочего органа в обрабатываемой среде показывает, что уменьшение тягового сопротивления наступает при импульсном воздействии рабочего органа, чередующемся с полной релаксацией напряжений сжатия. В почвенном пласте нарушаются связи между составляющими частицами, в результате чего облегчается их взаимное перемещение, то есть реализуется процесс смятия при вспашке. Наиболее простым по конструктивной реализации и менее затратным по энергетике и материалоемкости является спонтанный колебательный процесс, который совершается за счет переменного сопротивления почвы. Теоретический анализ скоростей воздействия вибрирующего органа на почву показывает, что для ударного воздействия с периодическим отрывом от почвы вибрация в режиме автоколебаний должна происходить в поперечном или вертикальном направлениях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: почвообрабатывающие орудия, принудительная вибрация, автоколебания, частота вибрации, амплитуда, тяговое сопротивление агрегата.

SUBSTANTIATION OF THE DIRECTION OF VIBRATION OF SOIL-TILLING WORKING BODY

**Vladimir V. Vasilenko
Dmitriy N. Afonichev
Sergey V. Vasilenko
Ivan Yu. Timofeev**

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Significant energy costs for soil chiseling and surface tillage can be decreased by means of vibration of working bodies (high frequency and small amplitude oscillations). The use of vibrations in soil cultivation is a fairly promising, but understudied process. The main difficulty of theoretical investigations is that the soils are very diverse in terms of their properties and represent a complex viscoplastic medium. It is believed that vibrations reduce the coefficient of soil friction on the working body, since it is recognized that during vibrations the contacting surfaces are momentarily separated, and the material travels some part of the way over the working body without friction. This point of view was taken as the basis of theoretical considerations in order to substantiate the rational direction of vibrations of the working body during soil tillage. A logical analysis of the process of vibration of the working body in the tilled medium shows that the reduction in draught resistance occurs under the impulse action of the working body that alternates with complete relaxation of compression stresses. The bonds between the constituent particles in the furrow slice are breaking, which facilitates their reciprocal displacement; i.e. this is the process of crushing during plowing. The simplest in terms of constructive implementation and less costly in terms of energy and material consumption is the spontaneous oscillatory process, which occurs due to variable soil resistance. A theoretical analysis of the rate of action of the vibrating body on the soil shows that for shock impact with periodic separation from the soil the vibrations in self-oscillation mode should occur in the transverse or vertical directions.

KEY WORDS: soil tillage tools, forced vibration, self-oscillation, vibration frequency, amplitude, draught resistance of the unit.

Введение

В настоящее время в опубликованных источниках информации отсутствуют убедительные теоретические обоснования причин уменьшения силы сопротивления почвообрабатывающего органа при его вибрации, также как и нет обоснования выгодного направления вибрации, ее амплитуды и частоты. Экспериментальные исследования здесь являются доминирующими, хотя и реализуются методом проб и ошибок.

Согласно исследованиям В.В. Мяло и В.В. Мазурова, значительные энергетические затраты на глубокое рыхление почвы и поверхностную обработку можно сократить, используя вибрацию рабочих органов (колебания высокой частоты и малой амплитуды) [2]. Примером такого режима колебаний может быть установка магнитострикторов на плуге [3], но это сильно усложняет конструкцию почвообрабатывающего орудия. По сравнению с магнитострикторами гидравлический возбудитель колебаний [6] выглядит проще.

Применение колебаний при обработке почвы – достаточно перспективный, но недостаточно исследованный процесс [2]. Главная трудность теоретического исследования состоит в том, что почвы очень разнообразны по своим свойствам и представляют собой сложную вязкопластичную среду. Есть мнение, что вибрация снижает коэффициент трения почвы о рабочий орган [1]. Это можно признать справедливым только для того случая, когда под действием колебаний налипшая почва сбрасывается с рабочего органа, и трение почвы по почве заменяется на трение почвы по стали. Но если сравнивать трение почвы по стали для двух случаев – с вибрацией или без нее, то для констатации факта снижения угла трения надо знать саму природу силы трения.

Очевидным может быть только тот факт, что при вибрации контактирующие поверхности на мгновения разъединяются, и материал какую-то часть пути пролетает над рабочим органом без трения. Положим эту точку зрения в основу наших дальнейших рассуждений и обоснуем рациональное направление колебаний рабочего органа при почвообработке.

Методика расчета

В теории вибрации существует понятие виброскорости [10]

$$V_{\text{виб}} = \omega \cdot A = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot A, \quad (1)$$

где $V_{\text{виб}}$ – виброскорость инструмента или рабочего органа, м/с;

ω – круговая частота кривошипа в механизме привода, с⁻¹;

A – амплитуда колебаний, м;

f – частота колебаний, или число оборотов кривошипа в секунду, Гц.

Если привод, допустим кривошипно-шатунный механизм (рис. 1), соединен непосредственно с рабочим органом, то амплитуда колебаний равна радиусу кривошипа, то есть $A = r$. Но если рабочий орган подвешен на рычаге, тогда амплитуда его колебаний изменяется

$$A = r \cdot \frac{L}{L_1}, \quad (2)$$

где L и L_1 – длины плеч рычажной подвески.

Выражение (1) относится к обоим вариантам привода, но для расчета амплитуды вибрации с рычажной подвеской надо учитывать выражение (2). Поскольку колебания носят синусоидальный характер, выражение (1) показывает максимальную скорость вибрации, когда угол ωt , отсчитываемый от горизонтального диаметра, равен $0,5\pi$. Можно ввести понятие средней скорости вибрации по ее модулю. Если колебания передаются рабочему органу без рычажной подвески, то с каждым оборотом кривошипа рабочий орган проходит расстояние, равное четырем амплитудам. Тогда

$$V_{\text{виб}} = \frac{2 \cdot \omega \cdot r}{\pi}. \quad (3)$$

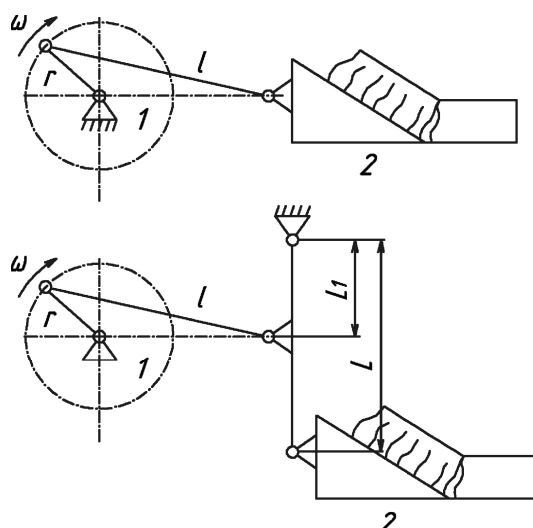


Рис. 1. Кинематика привода колебаний рабочего органа:
1 – механизм привода колебаний; 2 – почвообрабатывающий орган

Попытка объяснить математически чисто механические эффекты вибрации была предпринята И.Я. Федоренко [9]. Применим его методику к работе клина в почве. Согласно теории академика В.П. Горячкина, тяговое сопротивление плуга складывается из трех сил. Сила R_1 происходит от сопротивления колес перекачиванию по полю и от трения рабочих корпусов о стенку и дно борозды. Сила R_2 необходима для смятия пласта, а сила R_3 – для его переворота и отодвигания в сторону.

Уподобив все рабочие органы плуга двугранному клину (допущение, принимаемое академиком В.П. Горчкиным для теоретических исследований), обозначим эти силы при положительной и отрицательной скорости клина в течение одного периода продольных горизонтальных колебаний (рис. 2).

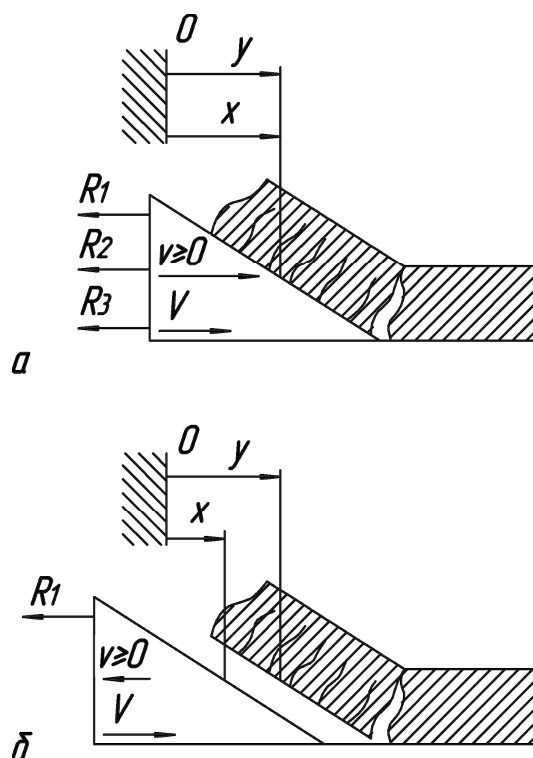


Рис. 2. Схема перемещений клина при продольной горизонтальной вибрации:
а – движение рабочего органа вперед, б – движение рабочего органа назад

Сила R_I всегда направлена назад, так как она почти вся расходуется на перекачивание орудия по стерне или взлущенному полю, а остальные две силы превращаются в нуль при движении корпусов плуга назад.

Абсолютная скорость v движения корпусов (или их заменяющего клина) складывается из скорости движения рамы плуга V и виброскорости клина

$$v = V + \frac{2 \cdot \omega \cdot r}{\pi} . \quad (4)$$

Экстремальные значения абсолютной скорости клина равны

$$v_{\text{экстр}} = V \pm 2\pi f A . \quad (5)$$

При достаточно энергичных колебаниях или при небольшой скорости движения агрегата может оказаться, что виброскорость больше скорости агрегата, то есть

$$2\pi f A \geq V , \quad (6)$$

и тогда клин отодвигается назад, между ним и почвенным пластом образуется щель. При менее энергичных колебаниях неравенство (6) становится обратным, усилие на пласт останется пульсирующим, но контакт клина с почвой не прерывается.

При отсутствии колебаний сопротивление клина остается постоянным. Если пытаться теоретически сопоставить силу сопротивления клина в этих режимах работы, используя только чисто механические эффекты вибрации, не принимая во внимание изменения внутреннего состояния пласта, то найти разницу будет невозможно, ибо существует закон сохранения энергии, по которому затраты энергии на перемещение физического тела из одного положения в другое не зависят от способа расчета. Положительное влияние вибрации на снижение силы сопротивления различным деформациям физического тела следует рассчитывать с учетом его распада на элементарные частицы, гранулы или комья и создания условий для их взаимного перемещения. А эти условия выполняются только с периодическим прерыванием контакта между клином и почвой, когда наступает релаксация напряжений в почвенном пласте, облегчается трение между элементарными частицами, и пласт легко деформируется, то есть поддается вспашке. Ярким примером самоорганизации сыпучего тела является работа пневматического сортировального стола для зерновых культур. Вибрация стола, передаваемая сыпучему телу, совместно с воздушными струями настолько облегчает трение между частицами, что они самостоятельно перераспределяются по слоям под действием практически ничтожной разницы силы собственной гравитации.

Результаты и их обсуждение

Рассчитаем, каким должен быть режим продольных колебаний корпуса плуга, чтобы периодически осуществлялась отрицательная скорость его абсолютного перемещения. По выражению (1), при скорости движения агрегата 2 м/с и амплитуде колебаний рабочего корпуса 5 мм частота вибрации должна быть

$$f \geq \frac{V}{2\pi A} = 63 \text{ Гц} .$$

Естественно, что свободные автоколебания такой частоты вибрации обеспечить не смогут. Для появления отрицательной скорости движения рабочего органа надо уменьшить скорость движения агрегата и увеличить амплитуду за счет применения меньшей жесткости пружин в рычагах подвески рабочих корпусов. Если, например, двигаться со скоростью 1,5 м/с, а амплитуду автоколебаний довести до 30 мм, то частота вибрации должна быть более 8 Гц, что уже может быть приемлемо для конструктивной реализации спонтанных колебаний.

Что касается вынужденных колебаний, то, по мнению И.Я. Федоренко [9], «снижения энергетических затрат можно добиться лишь в отношении тягового механизма трактора, а общие затраты (с учетом вибропривода) не могут быть уменьшены

посредством приложения вибрации». Отчасти поэтому он делает заключение, что вынужденные колебания имеет смысл применять для тихоходных почвообрабатывающих машин, рабочие скорости которых не более 2-3 км/ч. По его мнению, автоколебания реализуют большие амплитуды, поэтому их использование предпочтительнее.

Таким образом, логический анализ процесса вибрации рабочего органа в обрабатываемой среде показывает, что уменьшение тягового сопротивления наступает при импульсном воздействии рабочего органа, чередующемся с полной релаксацией напряжений сжатия. В почвенном пласте нарушаются связи между составляющими частями, в результате чего облегчается их взаимное перемещение, то есть реализуется процесс смятия при вспашке.

Наиболее простым по конструктивной реализации и менее затратным по энергетике и материалоемкости является спонтанный колебательный процесс, который совершается за счет переменного сопротивления почвы. Существуют конструкции с продольными [4, 5] и вертикальными [7, 8] колебаниями. Для обеспечения нулевых воздействий за счет чередующихся отходов рабочего органа от почвы в режиме автоколебаний с небольшими частотами направление вибрации не должно совпадать с направлением движения агрегата. Желательно, чтобы вибрация возникала в боковом или вертикальном направлениях.

Выводы

1. Для уменьшения силы сопротивления рабочего органа при обработке почвы его импульсное воздействие должно допускать отрывы от обрабатываемой среды, при которых почва распадается на составные элементы, способные к взаимному перемещению.

2. При совпадении направления движения агрегата с направлением колебаний рабочего органа скорость вибрации должна быть больше скорости движения агрегата. Такое соотношение скоростей доступно при применении вынужденных колебаний.

3. Спонтанные автоколебания, имея низкую частоту и увеличенную амплитуду, способны обеспечить периодические отрывы рабочего органа от обрабатываемой среды при несовпадении направления движения агрегата и направления колебаний, то есть они должны быть реализованы в боковом или вертикальном направлениях.

Библиографический список

1. Влияние вибрации на угол трения почвы по рабочему органу / В.В. Василенко, Д.Н. Афоничев, С.В. Василенко, Д.В. Стуров // Лесотехнический журнал. – 2013. – № 3 (11). – С. 94–97.
2. Мяло В.В. Энергосберегающие технологии при обработке почвы / В.В. Мяло, В.В. Мазуров // Вестник ОмГАУ. – 2016. – № 3 (23). – С. 242–244.
3. Пат. 2084091 Российская Федерация, МПК А01В 11/00, А01В 13/00 (1995.01). Навесной тракторный плуг / Боязный И.Б. ; заявитель и патентообладатель Боязный И.Б. – № 95103601/13 ; заявл. 14.03.1995 ; опубл. 20.07.1997, Бюл. № 20. – 3 с.
4. Пат. 2276491 Российская Федерация, МПК А01В 35/06, А01В 35/24, А01В 61/04 (2006.01). Культиватор / Кудзаев А.Б., Хадаев В.А., Цгоев А.Э. ; заявитель и патентообладатель Горский государственный аграрный университет. – № 2003120295/12 ; заявл. 02.07.2003 ; опубл. 20.05.2006, Бюл. № 14. – 3 с.
5. Пат. 2382538 Российская Федерация, МПК А01В 35/12, А01В 35/24 (2006.01). Культиватор на упругих стойках / Дмитриев С.Ю., Медведев В.И., Дмитриев Ю.П. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия». – № 2008117945/12 ; заявл. 04.05.2008 ; опубл. 27.02.2010, Бюл. № 6. – 3 с.
6. Пат. 2278825 Российская Федерация, МПК А01В 35/20, А01В 35/32, А01В 39/20 (2006.01). Рабочий орган культиватора / Устинов Н.Н., Кокошин С.Н., Смолин Н.И. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Тюменская государственная сельскохозяйственная академия. – № 2009136304/21 ; заявл. 30.09.2009 ; опубл. 20.09.201, Бюл. № 26. – 3 с.
7. Пат. 2449522 Российская Федерация, МПК А01В 35/32, А01В 39/28 (2006.01). Вибрационный глубокорыхлитель почвы / Гостев А.В., Плотников В.А. ; заявитель и патентообладатель ГНУ ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии РАСХН. – № 2010128595/13 ; заявл. 09.07.2010 ; опубл. 20.01.2012, Бюл. № 2. – 4 с.
8. Пат. 2478270 Российская Федерация, МПК А01В 11/00, А01В 3/36 (2006.01). Навесной вибрирующий плуг / Василенко В.В., Василенко С.В., Мухин А.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I». – № 2011141674/13 ; заявл. 13.10.2011 ; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10. – 4 с.
9. Федоренко И.Я. Теория взаимодействия вибрационных рабочих органов с почвой / И.Я. Федоренко // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 3. – С. 15–19.
10. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.Р. Ширман, А.Б. Соловьев. – Москва : Наука, 1996. – 276 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Владимир Васильевич Василенко – доктор технических наук, профессор кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, E-mail: vladva.vasilenko@yandex.ru.

Дмитрий Николаевич Афоничев – доктор технических наук, зав. кафедрой электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, E-mail: dmafonichev@yandex.ru.

Сергей Владимирович Василенко – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, E-mail: tuli-fruli@mail.ru.

Иван Юрьевич Тимофеев – магистрант кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, E-mail: smachin@agroeng.vsau.ru.

Дата поступления в редакцию 02.11.2017

Дата принятия к печати 26.11.2017

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Vladimir V. Vasilenko – Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, E-mail: vladva.vasilenko@yandex.ru.

Dmitriy N. Afonichev – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, E-mail: dmafonichev@yandex.ru.

Sergey V. Vasilenko – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Applied Mechanics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, E-mail: tuli-fruli@mail.ru.

Ivan Yu. Timofeev – Master's Degree Student, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, E-mail: smachin@agroeng.vsau.ru.

Date of receipt 02.11.2017

Date of admittance 26.11.2017