

С.М. Слободян, д-р техн. наук  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет, Россия  
С.А. Романишина,  
А.Ю. Романишин  
Житомирский национальный агроэкологический университет  
В.И. Стецюк  
Корпорация «Сварог Вест Групп», г. Житомир

## НЕРАВНОВЕСНОСТЬ ТЕРМОДИНАМИКИ ДИСКА КУЛЬТИВАТОРА В СРЕДЕ

*Шляхом систематизації механічних умов встановлено фактори нерівноваги термодинаміки поверхневого шару диска культиватора у неоднорідному середовищі. Розглянуто питання дослідження впливу стану неоднорідного середовища на процеси зношування диска культиватора. Оцінено фактори впливу середовища на динамічні харак-*

*теристики температури диска з урахуванням відмінностей дисперсності середовища*

*On the basis of systematization mechanical condition it was ascertained factor unbalanced thermodynamics of surface layer for disk cultivator in non-homogeneous medium. The issues of inspection of the influence of mechanical condition non-homogeneous medium on the slider wear of disk are considered. Estimation has been given to the influence disk rotation with regard for different dispersion inclusions medium.*

### Введение

Создание элементов и узлов агротехники с высокой надежностью при эксплуатации в настоящее время, как правило, включает этап исследования и анализа влияния особенностей вида нагрузки на долговечность работы основных элементов непосредственного механического воздействия на структуру и изменения состояния почвы, как сплошной среды, с учетом особенностей рабочего элемента и его взаимодействия с объектом воздействия – почвой. Для оценки эффективности разных форм и топологической структуры элементов и узлов агросистем в условиях изменяющихся воздействий и нагрузок могут быть использованы различные методы структурной и геометрической оптимизации [1–3]. Однако оценка эффективности применения методов оптимизации форм и свойств элементов может быть весьма затруднена рядом факторов.

Особенно затруднена оценка эффективности применения тех или иных форм режущих грунт элементов в условиях влияния ударных воздействий на материал элементов, например, при обработке грунта с дискретными включениями фракций более высокой упругости, чем основная среда, например, с каменными включениями. При-

сутствие таких включений в составе однородно распределенной сплошной среды в значительной степени снижает долговечность работы режущего элемента, обусловленного существенным влиянием импульсного и ударно-кинетического характера контактного силового взаимодействия на уровне предельных или близких к пределу разрушения элемента силовых нагрузок.

Перечисленные факторы определяют важность анализа поведения режущих элементов агротехники при нагрузках, учитывающих динамику движения и особенности структуры грунта применительно к проявлениям влияния температурных динамических факторов взаимодействия на материал элемента.

Исследование влияния стохастических факторов воздействий на долговечность элемента можно рассматривать в качестве одного из альтернативных подходов оценки эксплуатационной живучести элементов и конструкций агротехники.

Сложность оценки времени жизни режущего элемента (например, при взаимодействии с грунтом с дискретными каменными включениями) определена вероятностным характером процесса ударно-кинетического механизма контактного взаимодействия режущего элемента и фракций включений в среде, определяющему случайный характер температурного поля рабочей грани режущего элемента. Следует учитывать, что ввиду широкого спектра факторов взаимодействия, приводящих часто к взаимно противоположному направлению влияния на контактно взаимодействующие тела с разной зависимостью модуля упругости от температуры среды, живучесть режущего элемента может быть резко снижена.

### Оценка фактора случайности температурного поля диска

Исследование вариаций температурного поля и его влияния на фактор живучести материала режущего эле-

мента средств агротехники является одной из центральных проблем теории прочности материалов и долговечности эксплуатации изделий. Ученые мира посвятили данной проблеме множество работ [1–6]. Так, например, в [3, 4, 7] показано аналитическое решение двумерного нестационарного линейного уравнения теплопроводности при действии равномерно распределённого полосового источника постоянной интенсивности. Однако, учитывая обширность этой области и стохастические особенности применения режущих грунт элементов, остался целый ряд нерешённых проблем.

Анализ литературных источников показывает, что основной недостаток разработанных ранее моделей взаимодействия заключается в том, что мало уделено внимания анализу физико-механических условий в контактных задачах и статистическим особенностям формирования контактного пространства динамического силового взаимодействия режущего элемента с объектом воздействия – грунтом как сплошной однородно распределённой средой с дискретными упругими включениями инородных фракций.

Как правило, в известных математических моделях проводится усреднение дискретного стохастического потока кинетических воздействий в контактной области взаимодействия «элемент–среда», приводящих к стохастичности образования локальных тепловых источников (центров последующей локализации деформаций) – центров зарождения областей пространства локального приближения к проявлению и росту влияния фактора усталости (или локального источника генерации теплового потока) в наиболее пластичном сечении элемента – контактной области.

В результате можно говорить об отсутствии учёта импульсной природы теплового потока (в контактной области режущего элемента), приводящего к возникновению центров пластической деформации из-за действия локальных источников теплового проявления текучести материала элемента, зарождение которых обусловлено кинетическим характером контактного взаимодействия. Наличие этого фактора объяснимо весьма высокой статистической неоднородностью грунта как распределённой сплошной среды с дискретными, с весьма высоким модулем упругости, включениями. Именно эти фракции включений часто ограничивают быстрое действие режимов обработки почвы.

Проведен анализ влияния редких дискретных фракций (песчинки, элементы дискретных включений каменистого характера, включения с более высоким модулем упругости, чем основная среда почвы) на колебания температурного поля режущей кромки элемента силового воздействия на грунтовый слой почвы.

#### Неравновесная динамика теплового поля режущей грани диска

Локальное кинетическое воздействие на диск в значительной мере влияет на скорость изнашивания и разрушения поверхностного слоя его режущей кромки, элемента оказывающего силовое воздействие на слой почвы, от-

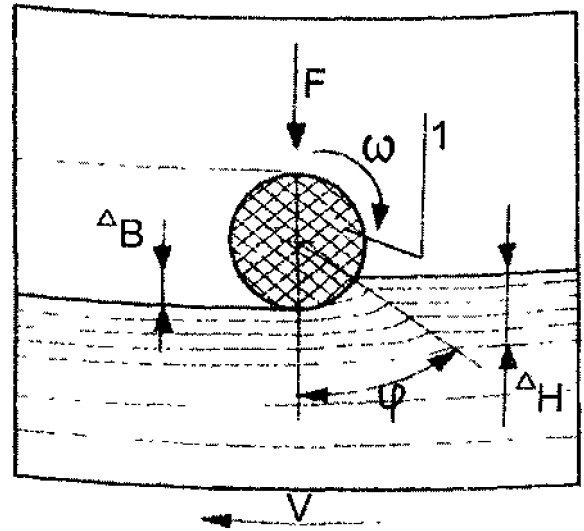


Рисунок 1 — Схема взаимодействия режущей кромки диска и почвы.

чего оно влияет и на работоспособность, стойкость и живучесть режущего или силового элемента агротехники.

Колебания температуры в распределении теплового поля режущей кромки элемента силового воздействия на почву как сплошную среду обусловлены кинетическим действием контактного взаимодействия с локальными дискретными фракциями включений, присутствующими в почве как в однородной распределённой сплошной среде, оказывающей силовое воздействие на режущую кромку элемента агротехники.

Рассмотрим процесс скольжения режущей кромки диска культиватора по плоскому (в микро- и мезомасштабном представлении структуры рассматриваемого контактного силового взаимодействия) слою сплошной среды (грунта, почвы). Другими словами, в области контактного взаимодействия среды (почвы) с режущей кромкой диска 1 (рисунок 1):  $F$  — сила воздействия на диск 1;  $\omega$  — круговая скорость;  $\Delta_B$  — уровень погружения диска в среду;  $\Delta_H$  — уровень возмущения слоя;  $\varphi$  — центральный угол зоны контакта среды с диском;  $v$  — линейная скорость движения диска).

Контактный слой сплошной среды (почвы) можно представить в виде некоторого произвольного пласта однородно распределённой сплошной среды с эффективными, с точки зрения влияния на формирование и динамику температурного поля динамического контактного пространства, размерами  $x, y$ . Если обозначить  $T(x, y, \tau)$  — пространственно-временное распределение температурного слоя сплошной среды (почвы), то пространственно-нестационарное нелинейное уравнение теплопроводности слоя среды в области контактного пространства можно представить в следующем виде

$$\rho_n c_n(T) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \text{div}[\lambda_n(T) \nabla T(x, y, \tau)],$$

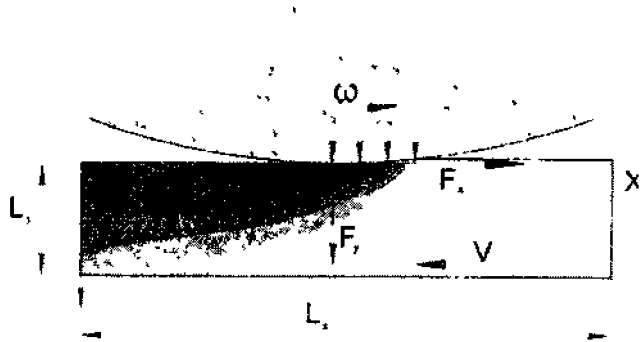


Рисунок 2 — Изменение пространственного распределения плотности потока тепла.

где  $\rho_n$  — плотность среды в области контактного пространства;  $c_n(T)$  — удельная теплоёмкость среды;  $x$  — продольная,  $y$  — вертикальная и  $z$  — поперечная координаты контактного пространства;  $\tau$  — текущее время;  $\lambda_n(T)$  — коэффициент теплопроводности слоя среды в масштабе контактного пространства;  $\nabla$  — лапласиан температурного поля. Удельная теплоёмкость и коэффициент теплопроводности слоя среды в общем случае есть функции температуры среды в области контактного пространства «диск-среда».

Примем (рисунок 2), что  $F_y$  — радиальная и  $F_x$  — касательная (тангенциальная) компоненты разложения силы резания вращающимся диском слоя среды,  $\dot{Q}(x)$  — функция изменения пространственного распределения плотности потока тепла, поглощаемого слоем среды в направлении линейного движения диска (по координате  $x$ ) и области контактного пространства;  $\omega$  — круговая скорость вращения диска, функция величины линейной скорости движения режущего элемента техники.

Процессу контактного силового взаимодействия вращающегося диска со слоем упругой сплошной среды свойственно возникновение достаточно высоких величин кинетической энергии линейного и кругового движения с последующей диссипацией части этих энергий (в результате выполненной работы) в образование достаточно весомого вклада в изменение температурного поля в области контактного взаимодействия. Преобразование кинетической энергии в тепловую обусловлено наличием процессов трения и разрушения структуры слоя сплошной среды в области контактного пространства, где и выделяется значительная часть тепловой энергии, изменяющей температурное поле контактного пространства и элементов контактной пары «диск-среда». Диссипация кинетической энергии является вкладом в изменение температурного поля, который приводит к существенному (в два и более раза) изменению теплофизических свойств материала режущего элемента (диска), но, что более существенно, во столько же раз, под воздействием растущей температуры контактного пространства, из-за влияния факторов трения и деструкции слоя среды изменяются модуль упругости и теплофизические свойства контактного слоя среды, прилегающего к режущей кромке диска

или любого другого режущего элемента. Но, если под воздействием роста температуры контактного пространства упругие свойства материала режущей кромки диска понижаются, то есть свойства материала диска изменяются в направлении повышения пластичности (материал диска становится более пластичным), то тенденция изменения упругих свойств обрабатываемого слоя почвы, как сплошной среды, под действием роста температуры контактного пространства идёт в обратном направлении — упругие свойства слоя среды (почвы), прилегающего к поверхности диска, повышаются. Возрастающая температура контактного пространства «сушит» контактирующий с диском слой среды — почвы, усиливая его абразивные свойства и, соответственно, снижая «живучесть» режущей кромки диска. Таким образом, возникающие закономерности изменения свойств материала диска и среды ведут к снижению живучести диска как режущего элемента.

### Модель теплового процесса контактного взаимодействия

Для формирования модели пространственного распределения температуры в области контактного пространства зададим граничные условия на верхней границе области оценки параметров закономерности изменения пространственного распределения теплового поля. В пространстве контактного взаимодействия среды и дискового режущего элемента примем тепловой поток через границу известным (это так называемое граничное условие второго рода) вида

$$\lambda_n(T) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial y} = \dot{Q}(x, \tau). \quad (1)$$

В первом приближении изложения настоящего анализа можно считать, что посторонние воздействия (например, ветровое, изменение температуры окружающей среды, осадки или принудительное охлаждение и т.п.), не учитываемые при анализе, не оказывают заметного влияния на анализируемую динамику температурного поля и тепловые процессы, протекающие в контактом пространстве взаимодействия диска и сплошной среды. Иначе говоря, возможным влиянием, не учитываемых в работе, факторов на динамику и пространственное распределение температурного поля в контактом пространстве пренебрегаем.

Вне области контактного пространства диска и среды примем также известное условие (условие третьего рода) — охлаждение посторонним воздействием любого вида с заданным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_r$  и температурой  $T_r$  подчиняется следующей закономерности:

$$\lambda_r(T) \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial y} = \alpha_r (T - T_r). \quad (2)$$

Пространственное распределение плотности теплового потока от ударно-динамического воздействия на диск дискретных упругих фракций в однородно распределённой сплошной среде может быть графически представлено в виде локально ограниченных концентрической формы случайной амплитуды тепловых «трубок», взаимно

не перекриваючихся в області контактного пространства, режущей слой среды, кромки диска. Другими словами, пространственное распределение плотности теплового потока от динамического и ударного воздействия дискретных упругих фракций, случайным образом включенных в однородно распределённую сплошную среду, можно считать случайным дискретным потоком теплового энергетического воздействия.

Такой случайной природы тепловой поток, в общем случае, может быть представлен в виде аддитивной суммы двух компонент случайного процесса: некоторого статистически среднего уровня медленно меняющейся пространственно распределённой монотонной компоненты с математическим ожиданием  $\bar{Q}_0(x, \tau)$ , среднее значение  $\bar{Q}_0(x, \tau) \equiv \langle Q_0(x, \tau) \rangle$  и вклада диссипации кинетической энергии во вклад импульсной природы переменной компоненты теплового потока  $\tilde{Q}_i(x, \tau)$ . Величина среднего уровня теплового потока обусловлена диссипацией кинетической энергии в процессе выполнения режущим элементом работы по разрушению структуры слоя среды его режущей кромкой и потерями энергии на преодоление сил трения поверхности режущего элемента о части разрушенной структуры слоя среды при движении режущего элемента в слое среды. Оба фактора ведут к росту температуры и величины среднего уровня температурного поля в пространстве контактного взаимодействия, но в наибольшей степени в области прямого соприкосновения поверхностей режущей кромки и слоя среды (почвенного грунта).

Средний уровень температурного поля нагретой режущей кромки элемента — диска, вращающегося с угловой скоростью  $\omega$  и движущегося в слое среды с линейной скоростью  $v$  — скоростью движения узла носителя диска, также перемещается в слое среды. Импульсная случайная компонента  $\tilde{Q}_i(x, \tau)$  теплового потока, поглощаемая диском, обусловлена диссипацией энергии, порождаемой высокоскоростными актами контактного взаимодействия кинетического механизма, возникающими в результате столкновения диска с инородными для основного состава сплошной среды дискретными фракциями включений. Инородные с большей упругостью, чем основная среда, фракции дискретных включений могут быть описаны, в зависимости от характера размещения их в среде, соответствующей плотностью вероятности распределения дискретных упругих включений — фракций в однородно распределённом слое более пластичной среды, например, грунта.

Поэтому динамика изменения импульсной случайной компоненты теплового потока в области режущей кромки диска находится в сильной взаимосвязи со скоростями вращения и линейного движения режущего элемента, плотностью распределения дискретных фракций (их частотой размещения и интервалом рассеяния) в слое среды, а также, что вполне естественно, со скоростью движения статистически среднего уровня температурного

поля (источником тепла), носителем которого выступает режущая кромка элемента.

Нестационарная компонента температурного поля — импульсный поток тепловых кинетических приращений температур в области режущей кромки элемента  $\tilde{Q}_i(x, \tau)$  является случайным, поскольку обусловлен случайными актами столкновений кинетического характера режущего элемента и среды со случайным пространственно распределёнными в более пластичном слое сплошной среды дискретными фракциями включений. Вполне естественно, что количество актов столкновения с фракциями на детерминированной траектории движения режущего слой среды элемента также будет случайно.

Если принимать во внимание средние статистические размеры упругих дискретных фракций и равновероятный закон их пространственного распределения в однородно распределённом слое сплошной среды — почвы, то средняя частота следования актов диссипации кинетической энергии дискретного импульсного контактного взаимодействия упругих фракций слоя среды с кромкой режущего элемента может быть определена вероятностным соотношением.

При этом, естественно, что положение актов кинетической энергии контактного взаимодействия фракций дискретных включений с режущей кромкой диска, как и величина абсолютного приращения рассеянной на режущей кромке динамического элемента импульса энергии контактного ударного взаимодействия являются случайными величинами.

Согласно положений теории вероятности, если  $m$  — некоторая мера (длина  $l$ , площадь  $s$ , объём  $v$ ) благоприятствующей области попадания точки, а  $M$  — мера всей области попадания точки (длина  $L$ , площадь  $S$ , объём  $V$ ), то вероятность попадания точки в благоприятствующую область при её случайном вбрасывании в область равна отношению меры благоприятствующей области к мере всей области попадания, то есть  $P = v/V$ . Подобное отношение будет и в случае принятия для численного расчёта линейных мер.

В нашем случае благоприятствующим исходом является попадание фракции (линейным размером  $d_f$  и площадью сечения  $s_f = \pi d_f^2/4$ ) на площадь режущей грани диска размером (в первом приближении) площади образующей цилиндра, погруженного в слой  $L_z 2\pi R_p d_n$  — средний геометрический размер источника энергии диссипации от кинетического акта режущей кромки с дискретной упругой фракцией включений в однородно распределённой сплошной среде;  $L_x$  и  $L_y$  — соответственно, длина и ширина режущей кромки элемента — диска, определяемая размерами контактного пространства взаимодействия диска со слоем среды в текущий момент времени в направлении линейного движения режущей кромки элемента;  $\tilde{Q}_i(x, \tau)$  — количество теплоты, образованной от акта диссипации кинетической энергии и энергии трения в акте кинетического взаимодействия элемента с  $i$ -той упругой фракцией дискретных включений в однородно распределённой сплошной среде.

Физически ясно, что средний геометрический размер источника энергии диссипации соизмерим со средним геометрическим размером фракций дискретных включений.

#### **Выводы**

В результате проведённого анализа предложено описание температурного поля контактного пространства «диск–среда» на базовой основе нелинейного уравнения нестационарной теплопроводности и представлен подход к разработке аналитической модели тепловых потоков распределения пространственного температурного поля режущей грани элемента вращения – диска агротехники с учётом фактора кинетического взаимодействия подвижной режущей грани диска с однородно распределённой сплошной средой, содержащей дискретные фракции упругих включений, обуславливающих импульсный характер диссипативных приращений теплового потока кинетической энергии и энергии трения контактного взаимодействия «диск–среда».

#### **Литература**

1. Vanderplaats, G.N. Numerical optimization techniques for engineering desing. – 3<sup>rd</sup> ed. – Colorado (Springs): Vanderplaats Research and Development, Inc., 2001. – 377 p.
2. Arora, J.S. Introduction to Optimum Design. – 2<sup>nd</sup> ed. – Elsevier, 2004. – 728 p.
3. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (износ и безызносность). – М.: МСХА, 2001. – 606 с.
4. Рыбакова, Л.М. Структура поверхностных слоёв металла при трении / Л.М. Рыбакова, Л.И. Куксенова // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1983. – №8. – С. 144–153.
5. Слободян, М.С. Анализ акустических методов диагностики запаса прочности материала / М.С. Слободян, С.М. Слободян // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – №3. – С. 23–28.
6. Деева, В.С. Динамика контактного пространства скольжения среды и поверхности рабочего органа агромашин / В.С. Деева, С.А. Романишина, С.М. Слободян // Промислова гідравліка і пневматика. – 2012. – №1(41).
7. Карножицкий, В.Н. Контактный теплообмен в процессах литья. – К.: Наукова думка, 1978. – 300 с.

*Надійшла 20.04.2012 р*