

УДК 530.1:621.9

С.М. Слободян, д-р техн. наук
Томский политехнический институт, Томск, Россия
С.А. Романишина,
А.Ю. Романишин, канд. техн. наук
Житомирский национальный агроэкологический университет, Житомир, Украина

ТЕПЛОВАЯ ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ “ДИСК — ГРУНТ”

THERMAL DYNAMICS OF CONTACT “DISK-NON-HOMOGENEOUS MEDIUM”

Исследованы влияния состояния неоднородной среды на термодинамику области контакта диска культиватора со случайно неоднородной средой — грунтом со случайными дискретными включениями. Дана оценка факторам влияния случайно неоднородной среды на динамику изменения температуры диска с учетом различия дисперсности среды.

Ключевые слова: среда, скользящий контакт, фракция, тепло.

Введение

В опубликованных ранее нами работах [1, 2] был проведен анализ влияния пространственно редких дискретных фракций (песчинки, элементы дискретных включений каменистого характера, включения с более высоким модулем упругости, чем основная среда почвы) на процессы износа и возникновения неравновесных колебаний температурного поля режущей кромки элемента (диска культиватора), оказывающего силовое воздействие на грунтовый слой почвы как случайно неоднородной сплошной среды.

Основной целью, представляемой ниже, работы является проведение анализа процессов контактного взаимодействия режущей кромки диска вращения культиватора со случайно неоднородной почвой — грунтом с дискретными включениями для получения закономерностей изменения среднего уровня температурного поля и теплового потока в контактном пространстве взаимодействия и на поверхности режущей грани элемента для разных вариаций условий контактного взаимодействия режущей грунт грани дискового элемента.

Оценка средних величин температурного поля

Для получения оценок среднего уровня температурного поля кромки элемента режущего слой среды и уровней амплитудных флуктуаций температурных приращений тепловой энергии, обусловленных ударно-кинетическим характером взаимодействия и, возникающими при этом, фактором диссипации кинетической энергии микроударов кромки режущего элемента о дискретные фракции и фактором трения поверхностных слоёв элемента и среды, может быть предложен следующий подход и методика.

Примем, что температурное поле в контактном пространстве “диск-среда” формируется за счет некоторой общей тепловой мощности образуемой аддитивным действием двух источников тепла. Одним — в первом приближении источником тепла в среднем почти постоян-

ной величины $\langle Q_0(x, \tau) \rangle = \bar{Q}_0$ и вторым — источником переменной импульсной компоненты тепла $Q_i(x, \tau) = \tilde{Q}_i$, то есть

$$P = \bar{P} + \tilde{P} = P(\bar{Q}_0) + P(\tilde{Q}_i). \quad (1)$$

Значения уровней общей суммарной мощности температурного поля контактного пространства взаимодействия элементов пары и обеих её аддитивных составляющих в среднем как детерминированных величин могут быть определены с помощью весьма простых выражений на основе знания площади контактного пространства режущей кромки элемента и с учетом влияния распределения плотности вероятности значения теплового потока энергии диссипации, поглощаемой поверхностями контактной пары “элемент-среда”,

$$\bar{P} = \bar{Q}_0 L_x L_z \quad (2.1)$$

и

$$\tilde{P} = \tilde{Q}_i L_x L_z. \quad (2.2)$$

где: $\tilde{Q}_i = \alpha_{пэ} (F_x v(\omega_{рэ}, v_x) / L_x L_z)$ — плотность теплового потока на контактной поверхности режущей грани элемента, образуемого в процессе диссипации ударно-кинетической энергии контакта “фракция-грань” и энергии рассеиваемой на поверхности элемента за счет действия сил трения при движении режущей грани в среде, $\alpha_{пэ}$ — коэффициент эффективности преобразования и поглощения тепловой энергии диссипации составляющих энергии ударно-кинетической и вклада трения,

$F_x = F \cos \varphi$ — касательная (тангенциальная) компонента силы давления F режущего элемента на слой среды, φ — угол разложения векторного параллелепипеда сил давления, $v(\omega_{рэ}, v_x)$ — результирующая скорость дви-

жения режущего элемента, в общем случае векторная сумма линейных скоростей вращательного движения.

Для оценки импульсной тепловой мощности, порождённой актами ударно-кинетического взаимодействия, с привлечением основ и понятий геометрии и геометрической вероятности, определяющей вероятность и частоту случайного попадания фракций на режущую грань элемента, может быть получено следующее выражение

$$\tilde{P}_i = \langle \tilde{Q}_i \rangle s_{\text{ти}} \sum_i n_{i\text{кф}}, \quad (3)$$

где $\langle \tilde{Q}_i \rangle$ — среднее значение уровня тепловой энергии, получаемой при ударно-кинетическом случайном воздействии грани режущего элемента на i -ю дискретную фракцию инородных включений в сплошную среду;

$n_{i\text{кф}}$ — среднее значение площади сечения тепловой “трубки” при диссипации ударно-кинетической энергии в i -том акте контактного динамического взаимодействия дискретного включения с режущей гранью элемента; — количество дискретных включений, одновременно вступающих в контакт с режущей кромкой элемента (на интервале длины образующей сектора диска контактного взаимодействия) на всем сечении контактного пространства части грани элемента со средой; для элемента цилиндрической формы их число может быть определено из выражения

$$n_{i\text{кф}} = \bar{n}_{\text{ф}} L_z / 2\pi R_p,$$

где $\bar{n}_{\text{ф}}$ — среднее нормированное число дискретных включений на единицу длины или интервала области контакта, в данном случае, на единицу длины окружности режущего слой среды диска.

Средний размер тепловых “трубок”, стохастично возникающих источников тепловой энергии в процессе диссипации энергии трения и энергии случайных актов столкновений ударно-кинетического характера, может быть найден на априорном знании дисперсности и структуры состава сплошной среды.

На основе изложенного, соотношение для аддитивной смеси компонент тепловой энергии (1) режущей грани дискового элемента примет вид

$$P = \bar{P} + \tilde{P} = \langle \tilde{Q}_i \rangle (d_{\text{ф}}^2 \bar{n}_{\text{ф}} / 8R_p) + \bar{Q}_0 L_x = \bar{Q} L_x. \quad (4)$$

В принципе можно провести оценку степени пространственной неравномерности распределения температурного поля режущей кромки диска, введя безразмерный (в относительных единицах) параметр $k_{\text{нп}}$ — относительной неравномерности плотности распределения энергии температурного поля — теплового потока в контактное пространство

$$k_{\text{нп}} = \max \{ \tilde{Q}_i / \bar{Q}_0 \} \geq 0.$$

Очевидно, что мера относительной неравномерности температурного поля контактной грани дискового элемента в зависимости от динамики его движения и структуры сплошной среды будет принимать значения, лежащие в диапазоне положительной числовой оси $[0 \dots \infty]$.

Поскольку характер распределения импульсов теплового потока, порождаемого в результате актов ударно-кинетической природы и диссипации энергии трения, случаен, то импульсную случайную компоненту теплового потока приращений температурного поля в среднем можно характеризовать соотношением

$$\tilde{Q}_i = \bar{Q}_0 k_{\text{нп}} \zeta_Q. \quad (5)$$

Здесь ζ_Q — случайная относительная величина, в рассматриваемом случае значения которой равномерно распределены в единичном интервале $[0; 1]$.

Для равномерного закона распределения случайной величины её среднее значение $\langle \zeta_Q \rangle$ как величина математического ожидания равно $\langle \zeta_Q \rangle = m[\zeta_Q] = 0,5$; дисперсия $D[\zeta_Q] = 1/12$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma[\zeta_Q] = 1/2\sqrt{3} = \sqrt{3}/6$.

Иначе говоря, среднее квадратическое отклонение значения случайной величины ζ_Q составит примерно 0,29 значения её относительного статистически единичного интервала изменения.

Для оценки динамики изменений уровня среднего значения температурного поля режущей кромки элемента, в частном случае, примем закон распределения плотности вероятности случайной величины ζ_Q равномерным. В этом случае среднее значение уровня температурного поля, а значит, теплового потока в контактное пространство и на поверхности режущей кромки элемента, если следовать (6) и (7), определится соотношением

$$\bar{Q}_0 = \bar{Q} \left[16R_p L_x / (16R_p L_x + k_{\text{нп}} d_{\text{ф}}^2 \bar{n}_{\text{ф}}) \right]. \quad (6)$$

Использование (6) в выражении (4) позволит определить параметры тепловых импульсов локальных “трубок” — источников температурных приращений, обусловленных потоком случайных актов ударно-кинетического контактного взаимодействия фракций дискретных включений с динамически подвижной кромкой режущего слой среды элемента.

Частота контактных соударений упругих фракций дискретных включений среды с режущей кромкой элемента шириной L_x может быть определена с учётом статистических свойств рассеяния неоднородностей в однородно распределённой сплошной среде. Среднее число случайных актов ударно-кинетического взаимодействия с

режущей кромкой элемента шириной L_z за один оборот дискового элемента составит

$$n_a = \bar{n}_\phi d_\phi^2 / 8L_z R_p.$$

Период оборота диска $T_\omega = 2\pi R_p / \omega_p$. Отсюда, средняя длительность интервала между случайными актами в потоке ударно-кинетического взаимодействия фракций включений с режущей кромкой элемента (из отношения средних сечений фракций) определится выражением

$$\bar{t}_a = T_\omega / n_a = 16\pi R_p L_z / \omega_p \bar{n}_\phi d_\phi^2.$$

Для примера: при соотношении линейных размеров $L_x = 8L_z$ получим

$$\bar{t}_a = T_\omega / n_a = 2\pi R_p L_x / \omega_p \bar{n}_\phi d_\phi^2.$$

В общем случае, интервал времени между актами соударения фракций с режущей кромкой дискового элемента величина случайная, закон распределения плотности вероятности которой связан с особенностями статистического распределения фракций упругих включений в однородно распределённой сплошной среде.

Для решения поставленной в работе задачи, в принципе, может быть использован численный метод конечных разностей достаточно подробно изложенный в [3-5]. Для аппроксимации уравнения теплопроводности может быть использована явная двухслойная схема, являющаяся линейным симбиозом двух известных схем — явной шеститочечной и Алена-Чена.

Сущность решения. Производная $\partial T(x, y, \tau) / \partial y$ в принятых граничных условиях заменяется конечной разностью третьего порядка точности. Применяемому численному методу присуща высокая точность оценки процесса с большими градиентами температур свойственного процессу ударно-кинетического высокоскоростного взаимодействия грани режущего элемента со средой, содержащей дискретные упругие фракции инородных включений. Реализация численного метода в рассматриваемой задаче выполнялась с разработкой прикладного программного обеспечения на языке C++ (в среде Borland-Delfi).

Результаты расчётов закономерности изменения (рисунок 1) среднего уровня температурного поля режущего элемента, определяемого средним значением мощности теплового потока в контактном пространстве и (рисунок 2) на поверхности режущей грани элемента для разных вариаций степени неравномерности плотности распределения теплового потока показаны на обоих рисунках в нормированной координатной сетке.

Закономерности временных вариаций среднего уровня температурного поля режущего элемента, изображенные на рисунке 2, наглядно показывают, что дисперсия случайного процесса ударно-кинетического вклада во временное изменение температурного поля режущей грани элемента возрастает с ростом степени неравномерно-

сти теплового потока, обусловленного процессами трения и ударно-кинетическим механизмом формирования приращений энергии температурного поля контактного пространства режущей кромки дискового элемента со случайно неоднородной средой.

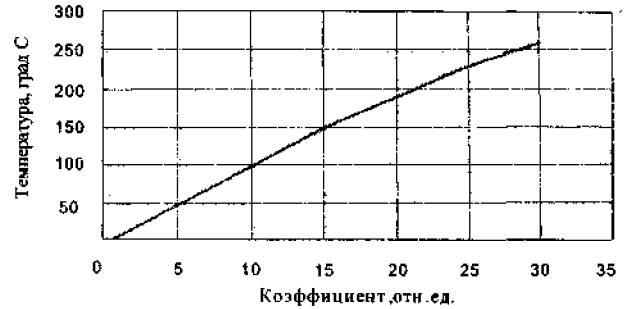


Рисунок 1 — Изменение средней температуры грани элемента от коэффициента эффективности поглощения тепловой энергии диссипации, энергии ударно-кинетического взаимодействия и вклада трения

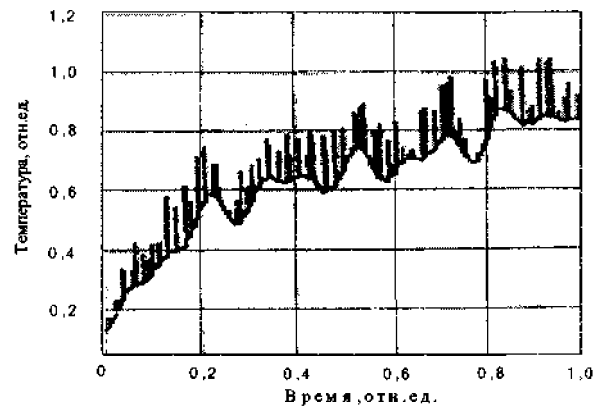


Рисунок 2 — Типичная временная реализация процесса изменения мгновенной температуры режущей грани элемента в реальном времени взаимодействия с неоднородной средой

Подобное поведение температурного поля контактного пространства режущей грани дискового элемента наблюдается и в исследованиях подобных процессов при решении задач в области дерево- и металлообработки.

Критерии оценки неустойчивости температурного поля

Простейший критерий оценки вариаций температурного поля режущей грани элемента может быть основан на контроле величины амплитуды выбросов весьма неравномерной динамики изменения приращения температуры в контактном пространстве. В случае применения на практике этого детерминированного критерия оценки поведения температурного поля может быть получена закономерность изменения температуры режущей грани

елемента от степени (коэффициента) неравномерности плотности распределения теплового потока, обусловленного как трением, так и ударно-кинетическим механизмом преобразования энергии контактного взаимодействия фракций и элемента в тепловые импульсы приращения температуры. Последний фактор — коэффициент неравномерности плотности распределения теплового потока является функцией степени структурной неоднородности слоя сплошной среды и динамики движения как самого режущего элемента (например, скорости его вращения), так и скорости движения носителя этого элемента.

При существенной неоднородности (высокая частота ударно-кинетических столкновений с фракциями из-за большого числа дискретных упругих включений в однородно распределённой структуре слоя среды) число и частота температурных выбросов тепловой энергии, получаемой от трения и актов ударно-кинетического характера соударений режущей грани элемента с фракциями, также возрастают. С учетом интегральных свойств явления теплопроводности среды и материала режущего элемента это приводит к появлению не только роста приращений тепловой энергии в высокочастотной части температурных воздействий, формируемой импульсной последовательностью приращений тепловой энергии ударно-кинетической природы, но и к более мощным низкочастотным колебаниям плотности распределения температурного поля элемента. Низкочастотная часть спектра колебаний температурного поля элемента обусловлена фактором влияния теплопроводности (теплопередачи) материала элемента и значительно большей общей площадью элемента, чем площадь его части в контактном пространстве слоя сплошной среды с более низкой температурой, чем температура режущего элемента.

Заключение

В настоящей работе на базовой основе нелинейного уравнения нестационарной теплопроводности представлена аналитическая модель тепловых потоков распределения пространственного температурного поля режущей грани элемента вращения — диска агротехники с учётом фактора ударно-кинетического взаимодействия подвижной режущей грани элемента с однородно распределённой сплошной средой, содержащей дискретные фракции упругих включений, обуславливающих импульсный характер диссипативных приращений теплового потока энергии трения и кинетической энергии.

Обоснована правомерность аналитического исследования совместного формирования диссипативных тепловых потоков обусловленных различной природой как аддитивной смеси медленно меняющихся инерционных компонент потока тепловой энергии и температурного поля и импульсной нестационарной случайной последовательности импульсных — коротких по времени температурных приращений тепловой энергии, вызванных диссипацией энергии ударно-кинетического характера контактного взаимодействия.

Анализом установлена справедливость вышеизложенной модели температурного поля для оценки средних значений как медленно меняющейся инерционной компоненты, так и более высокочастотной импульсного характера флуктуационной компоненты случайных приращений температурного поля режущего элемента.

Проведённым исследованием показана пригодность аналитической модели температурного поля ударно-кинетического контактного взаимодействия режущей грани подвижного элемента со сплошной средой с дискретными упругими включениями для целей прогноза живучести режущих элементов средств агротехники.

Литература

1. Деева, В.С., Романишина, С.А., Слободян, С.М. Динамика контактного пространства скольжения среды и поверхности рабочего органа агромашин // Промислова гідравліка і пневматика. — 2012. — №1(35). — С. 22—26.
2. Слободян, С.М., Романишина, С.А., Романишин, А.Ю., Стецюк, В.И. Неравновесность термодинамики диска культиватора в среде // Промислова гідравліка і пневматика. — 2012. — №2(36). — С. 66—70.
3. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов. — М.: Высшая школа, 2002. — 840 с.
4. Самарский, А.А., Вабишевич, П.Н. Вычислительная теплопередача. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 782 с.
5. Рындин, Е.А. Методы решения задач математической физики. — М.: МГУ, 2012. — 119 с.

References

1. Deeva, V.S., Romanishina, S.A., Slobodian, S.M. Dinamika kontaktnogo prostranstva skolyzheniya sredy i poverkhnosti rabochego organa agromashin // Promislova hidravlika i pnevmatika. — 2012. — №1(35). — С. 22-26.
2. Slobodian, S.M., Romanishina, S.A., Romanishin, A.Yu., Stetsyuk, V.I. Neravnovesnost termodinamiki diska kultivatora v srede // Promislova hidravlika i pnevmatika. — 2012. — №2(36). — С. 66—70.
3. Verghbitskiy, V.M. Osnovy chislennykh metodov. — М.: Vysshaya shkola, 2002. — 840 s.
4. Samarskiy, A.A., Vabishevich, P.N. Vychislitelnaia teploperedacha. — М.: Editorial URSS, 2003. — 782 s.
5. Ryndin, E.A. Metody resheniya zadach matematicheskoi fiziki. — М.: MGU, 2012. — 119 s.

Надійшла 4.04.2013 року

УДК 530.1:621.9

**ТЕПЛОВА ДИНАМИКА КОНТАКТНОЇ
ОБЛАСТІ “ОБЕРТАЛЬНИЙ ДИСК-СЕРЕДО-
ВИЩЕ З ДИСКРЕТНИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ”**

**С.М. Слободян,
С.А. Романишина, А.Ю. Романишин**

Встановлено залежність параметрів температурного поля кромки диску, який розрізає шар суцільного середовища з дискретними включеннями. Визначено формування теплового потоку контактної динамічної області кромки диску у вигляді нелінійного двохвимірної рівняння нестационарної теплопровідності. Враховано ударно-кінетичний механізм контакту диска з фракціями та імпульсний характер збільшення теплового поля диску в адитивній суміші з середньою температурою диску.

Ключові слова: суцільне середовище, ковзаючий контакт, фракція, тепло.

UDC 530.1:621.9

**THERMAL DYNAMICS OF CONTACT
“DISK-NON-HOMOGENEOUS MEDIUM”**

**Slobodyan S.M.,
Romanishina S.A., Romanishin A.Ju.**

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 cultivator with regard for different dispersion inclusions medium.

Key words: medium, sliding contact, fraction, thermal.