

ния воздуха в них, эффективна. При этом обеспечивается уменьшение глубины следов при одновременном повышении грузоподъемности машин и сохранении коэффициента загрузки двигателя трактора.

Для минимизации уровня воздействия на почву ходовых систем указанных МВОУ рекомендуется создание четырех- и трехосных ходовых систем при грузоподъемности машин около 16 т. Ориентировочные значения параметров шин: диаметр – 1300 мм, ширина – 500...600 мм, посадочный диаметр – 0,508 м (20 дюймов), стрела дуги протектора – 70 мм, относительная деформация – 23 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Агейкин, Я.С. Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 242 с.
2. Гедроить, Г.И. Взаимодействие с почвой многоколесных ходовых систем / Г.И. Гедроить, А.Г. Гедроить, А.Д. Четкин // Агропанорама. – 2012. – № 5. – С. 2-7.
3. Гедроить, Г.И. Совершенствование профиля пневматических шин для сельскохозяйственной техни-

ники / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2017. – № 5. – С. 2-5.

4. Гедроить, Г.И. Сопротивление качению ведомых пневматических колес / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2010. – № 1. – С. 26-30.

5. Гедроить, Г.И. Опорные свойства шин для сельскохозяйственной техники / Г.И. Гедроить // Агропанорама. – 2009. – № 4. – С. 23-27.

6. Гедроить, Г.И. Расчет нормируемых показателей воздействия колесных движителей на почву на стадии проектирования машин / Г.И. Гедроить // Современная сельскохозяйственная техника. Исследование, проектирование, применение: матер. Междунар. научно-практич. конф., Минск, 26-28 мая 2010 г.: в 2-х ч. – Минск: БГАТУ, 2010. – Ч. 1. – С. 126-129.

7. Трепененков, И.И. Об использовании мощностей сельскохозяйственных тракторов / И.И. Трепененков, В.И. Мининзон // Тракторы и сельхозмашины. – 1987. – № 3. – С. 13-15.

8. Скотников, В.А. Проходимость машин / В.А. Скотников, А.В. Пономарев, А.В. Климанов. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 328 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 30.01.2020

УДК 631.365.22:62.662.3

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ТОПЛИВА В ТОПОЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В.В. Поддубицкий,

*науч. сотр. сектора «Технологии утилизации отходов» ГП «Институт энергетики НАН Беларуси»,
магистр техн. наук*

В.Н. Дашков,

докт. техн. наук, профессор

В.П. Чеботарев,

зав. каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

В статье представлены результаты теоретических исследований движения топливной частицы после отрыва ее от винтовой поверхности рабочего органа распределителя топлива в слоевой топке воздухонагревателя зерносушилки.

Ключевые слова: винтовая поверхность, топливные частицы, силы, оси, скорость.

The article presents the results of theoretical studies of the fuel particle movement after detaching it from the screw surface of the fuel distributor in a layer furnace of a grain dryer air heater.

Keywords: screw surface, fuel particles, forces, axes, speed.

Введение

Одной из важнейших операций послеуборочной обработки зерна является его сушка. Для обеспечения качественной и своевременной сушки применяются зерносушилки, работающие на природном газе, дизельном топливе и твердых видах местного топлива. С целью экономии бюджетных средств при закупке угледородного топлива, в последнее время были разработаны твердотопливные воздухонагреватели зерносушилок

различной конструкции. Одной из принципиально новых конструкций твердотопливных топков воздухонагревателей является слоевая топка с неподвижной колосниковой решеткой и распределителями топлива. В таких топках мелкофракционное топливо подается гравитационным способом, и после распределения падает и частично сгорает в топочном пространстве.

Горению мелкофракционного топлива в топочном пространстве посвящены работы выдающихся советских ученых в области физики и химии горения:

Л.Н. Хитрина [1] и Б.В. Канторовича [2, 3]. В них подробно описывается горение топливной частицы в ламинарном и турбулентном воздушных потоках, однако не уделено внимание движению топливной частицы с заданными начальными условиями скорости движения. Поэтому целью настоящей работы является изучение зависимости движения горячей топливной частицы, получившей начальную скорость и направление при сходе с винтовой поверхности рабочего органа распределителя топлива.

Основная часть

После отрыва частицы топлива от винтовой поверхности, она начинает движение в топочном пространстве. Начальная скорость частицы \vec{v}_{q0} равна скорости движения ее в момент отрыва от поверхности витка. Проекция скорости \vec{v}_{q0} на оси имеет вид:

$$OX : v_{q0X} = \frac{\omega S}{2\pi}; \quad (1)$$

$$OY : v_{q0Y} = \omega r_{\text{оп}} \operatorname{tg} \alpha; \quad (2)$$

$$OZ : v_{q0Z} = -2\pi\omega r_{\text{оп}}; \quad (3)$$

где ω – угловая скорость вращения шнека, с^{-1} ;

S – шаг витка, м;

α – угол подъема винтовой линии, град.

Принимая, что при $r_{\text{кр}}$ отрыв топливной частицы от винтовой поверхности невозможен, радиус отрыва $r_{\text{оп}}$ будет лежать в пределах $r_{\text{кр}} > r_{\text{оп}} > r$.

В полете (рис. 1.) на частицу действует ряд сил: сила тяжести G , сила Архимеда F_A , реактивная сила F_R , сила подпора F_{Π} (сила сопротивления воздушной среды или сила лобового сопротивления), подъемная сила $F_{\text{нод}}$ и сила присоединенных масс F_m . В некоторых конструкциях твердотопливных топок воздушно-нагревателей предусмотрен дымоход с естественной или искусственной тягой, а также она может оснащаться устройством поддува вторичного воздуха под колосники. В этом случае на частицу топлива будет действовать сила тяги $F_{\text{тяги}}$ и сила поддува $F_{\text{поддув}}$.

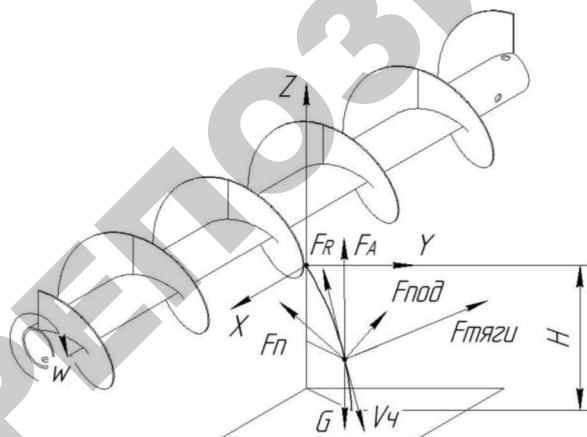


Рисунок 1. Траектория движения топливной частицы в пространстве после взаимодействия с винтовой поверхностью

Принимается, что в топке принудительного дутья нет. Закон сохранения движения для топливной частицы будет иметь вид:

$$m_q \frac{dv_q}{dt} + \vec{v}_q \frac{dm_q}{dt} = \vec{G} + \vec{F}_A + \vec{F}_R + \vec{F}_{\text{тяги}} + \vec{F}_{\Pi} + \vec{F}_{\text{нод}} + \vec{F}_m, \quad (4)$$

где v_q – скорость частицы, м/с;

t – время, с;

m_q – масса частицы, кг.

После расположения центра прямоугольной системы координат в точке отрыва частицы от винтовой поверхности, ось OZ примет направление вертикально вверх, ось OX – вдоль оси вращения винтовой поверхности, которая лежит в продольном сечении топочного пространства. Ось OY находится в этой же плоскости перпендикулярно к оси OX.

Сила тяжести равна:

$$\vec{G} = m_q \vec{g}, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Значения ее проекций на оси OX и OY равны нулю.

Сила Архимеда в случае полета частицы с воздействием сдвига воздушного потока действует по оси OZ и направлена в противоположную сторону действию силы тяжести. В векторной форме сила Архимеда имеет вид [4]:

$$\vec{F}_A = -m_q \frac{\rho}{\rho_q} \vec{g}, \quad (6)$$

где ρ – плотность воздуха в нормальных условиях, кг/м^3 ;

ρ_q – плотность топлива, кг/м^3 .

После исключения собственного вращения частицы и при условии, что она выгорает несимметрично [2], скорость выгорания в фронтальной полусфере выше, чем выгорание в задней, а скорость отделения продуктов сгорания зависит от вида и химического состава топлива и ориентировочно составляет 140...200 м/с [1]. Возникающая результирующая реактивная сила F_R будет противоположна вектору скорости движения частицы. Создающийся огненный след окутывает боковые и тыльную поверхности частицы, препятствуя подводу кислорода, отделение газов происходит только из фронтальной полусферы [1].

Реактивная сила F_R описывается уравнением:

$$\vec{F}_R = -\vec{v}_{\text{газ}} \frac{dm_q}{dt}, \quad (7)$$

где $v_{\text{газ}}$ – скорость отделения газов (скорость отделения продуктов сгорания), м/с.

Сила тяги направлена в сторону выходного отверстия, расположенного в торцевой стенке прямоугольной топки, через которое истекают дымовые газы. Относительно направления движения топливной частицы и направления вращения винтовой поверхности, сила тяги может быть направлена по ходу движения топливной частицы или против ее хода. Следовательно, $F_{\text{тяги}}$ будет либо увеличивать скорость полета частицы, уменьшая время нахождения

ее в зоне горения, либо затормаживать частицу, что позволяет более эффективно сжечь ее в полете.

В векторной форме сила тяги $F_{тяги}$ равна [3]:

$$\vec{F}_{тяги} = k_x \gamma_z S_q \frac{\vec{\omega}_v |\vec{\omega}_v|}{2\vec{g}}, \quad (8)$$

где ω_v – относительная скорость частицы, м/с [5];

γ_z – удельный вес газа, н/м³;

k_x – коэффициент лобового сопротивления,

$$k_x = \frac{24\mu g}{\omega_v d_q \gamma_z};$$

d_q – диаметр частицы, м;

μ – коэффициент динамической вязкости среды,

Па · с;

$S_q = \pi r_q^2$ – площадь миделевого сечения, м².

Относительная скорость частицы равна $\vec{\omega}_v = \vec{U} - \vec{v}_q$;

где U – скорость воздушного потока, м/с;

Так как соотношение длины и ширины топки больше 1, принимается, что воздушные потоки, проходящие через колосниковые решетки, отверстия на лицевой стороне топки (конструктивные отверстия в дверцах) и через топливный бункер над винтовой поверхностью, перемешиваются и действуют только в направлении оси OX.

Сила подпора действует в противоположном направлении направлению движения частицы. Так как частица движется не только под действием силы тяжести, но и имеет горизонтальный снос воздушным потоком, то сила подпора будет действовать по двум плоскостям:

в вертикальной плоскости, совпадая с осью OZ [4, 6]

$$\vec{F}_{Пz} = k_x \gamma_z S_q \frac{\vec{\omega}_s |\vec{\omega}_s|}{2\vec{g}}, \quad (9)$$

где $\omega_s = \sqrt{\frac{4\gamma_q d_q g}{3\gamma_z k_x}} = \sqrt{\frac{8\gamma_q r_q g}{3\gamma_z k_x}}$ – скорость вита-

ния, м/с;

в горизонтальной плоскости [4, 7, 8, 9, 10]

$$\vec{F}_{Пx,y} = C_T \frac{\rho \vec{\omega}_v |\vec{\omega}_v|}{2} S_q, \quad (10)$$

где C_T – коэффициент лобового сопротивления.

Коэффициент лобового сопротивления можно

записать в виде: $C_T = \frac{24}{Re} = \frac{12\mu}{\rho r_q \vec{\omega}_v}$,

где Re – число Рейнольдса.

Подъемная сила $F_{под}$ действует перпендикулярно направлению движения топливной частицы [7, 8, 9]:

$$F_{под} = C_Y \frac{\rho \vec{v}_q |\vec{v}_q|}{2} S_q, \quad (11)$$

где C_Y – коэффициент подъемной силы, зависящий от ориентации частицы в пространстве (угла атаки).

При нестационарном движении, на частицу дополнительно действует сила присоединенных масс,

направленная противоположно вектору ускорения частицы [4, 11]

$$\vec{F}_m = -\frac{2}{3} \rho \pi r_q^3 \frac{d\vec{v}_q}{dt}. \quad (12)$$

Так как подъемная сила имеет незначительное влияние на движение частицы, а плотность частицы многократно выше плотности среды, то при расчетах подъемной силой и силой присоединенных масс можно пренебречь [6].

Таким образом, с учетом вышеизложенного, уравнения движения топливной частицы вдоль осей будут иметь вид [10, 12]:

$$OX: m_q \frac{dv_{qx}}{dt} + v_{qx} \frac{dm_q}{dt} = -F_{Rx} + F_{тягиqx} - F_{Пx}; \quad (13)$$

$$OY: m_q \frac{dv_{qy}}{dt} + v_{qy} \frac{dm_q}{dt} = -F_{Ry} + F_{тягиyx} - F_{Пy}; \quad (14)$$

$$OZ: m_q \frac{dv_{qz}}{dt} + v_{qz} \frac{dm_q}{dt} = G - F_A - F_{Rz} - F_{Пz}, \quad (15)$$

где v_x, v_y, v_z – проекции скоростей движения топливной частицы, соответственно на оси OX, OY и OZ.

После преобразования и подстановки в уравнения (13-15) значения сил, система уравнений будет равна:

$$\left. \begin{aligned} OX: m_q \frac{dv_{qx}}{dt} - v_{qx} \frac{dm_q}{dt} &= v_{zaz} \frac{dm_q}{dt} + 6\mu\pi(U - v_{qx})[r_q - 1]; \\ OY: m_q \frac{dv_{qy}}{dt} - v_{qy} \frac{dm_q}{dt} &= v_{zaz} \frac{dm_q}{dt} - 6\mu\pi v_{qy}(r + 1); \\ OZ: m_q \frac{dv_{qz}}{dt} - v_{qz} \frac{dm_q}{dt} &= m_q \frac{\rho}{\rho_q} g + v_{zaz} \frac{dm_q}{dt}; \\ \frac{dm_q}{dt} &= -4\pi\rho_q \sqrt{\frac{3m_q}{4\pi\rho_q}} \cdot \frac{k'Mc_0}{\gamma_q} \cdot \left[1 - \frac{1}{\alpha_T} + \frac{\sqrt{\frac{3m_q}{4\pi\rho_q}}}{r_{q0}\varepsilon} - \frac{\sqrt{\frac{3m_q}{4\pi\rho_q}}}{r_{q0}\varepsilon\alpha_T} + \frac{3m_q}{4\pi\rho_q r_{q0}^3 \alpha_T} + \frac{\left(\frac{3m_q}{4\pi\rho_q}\right)^2}{r_{q0}^4 \varepsilon\alpha_T} \right]; \\ \frac{dx}{dt} &= v_{qx}; \\ \frac{dy}{dt} &= v_{qy}; \\ \frac{dz}{dt} &= v_{qz}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где α_T – коэффициент избытка воздуха, кг/кг (м³/м³);

ε – отношение внешней реакционной поверхности к внутренней;

c_0 – начальная весовая концентрация газа, кг/м³;

M – стехиометрический коэффициент реакции;

k' – суммарная константа скорости реакции процесса, моль/с.

После решения системы уравнений (16) методом Рунге-Кутты, в программе VBA был построен график изменения траектории движения топливной частицы в топочном пространстве (рис. 2).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

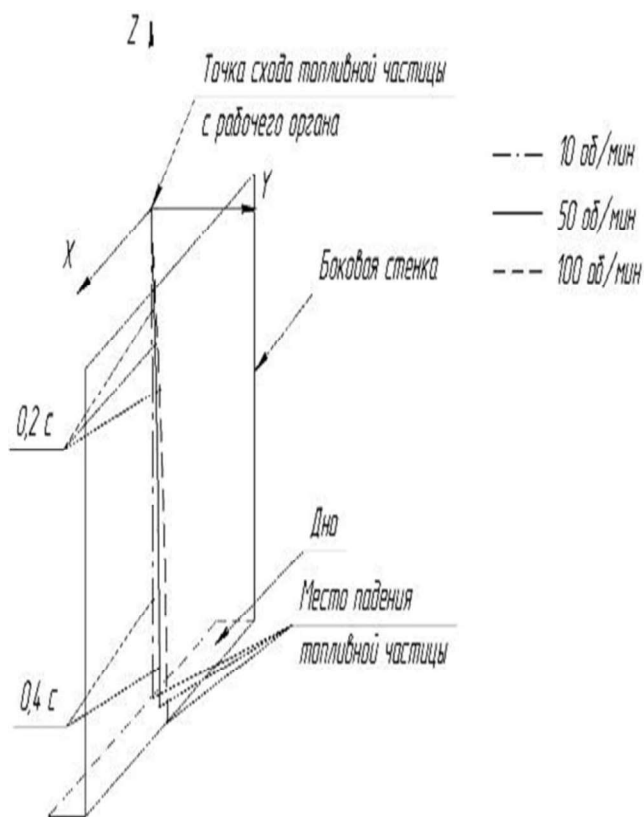


Рисунок 2. График изменения траектории движения топливной частицы

Анализ графика показал, что основное перемещение топливной частицы происходит по осям OX и OZ .

При изменении частоты вращения рабочих органов удалось достичь улучшения равномерности распределения топлива от 34 до 69 %, в зависимости от топлива.

Заключение

В результате теоретических исследований установлено, что конструктивно-кинематические параметры рабочих органов распределителей топлива существенно влияют на параметры движения горячей топливной частицы в топочном пространстве. Так, изменяя частоту вращения рабочих органов и учитывая количество подаваемого в топочное пространство воздуха и его скорость, можно добиться улучшения распределения топлива, полноты его сгорания и уменьшить тепловое и весовое воздействие на колосниковую решетку.

При экспериментальном подтверждении теоретических исследований, при частоте вращения рабочих органов 50 об/мин, было достигнуто снижение неравномерности распределения от 34 до 69 % в зависимости от вида топлива. Это позволило уменьшить химический и механический недожог топлива и, соответственно, снизить вредные выбросы в окружающую среду.

1. Хитрин, Л.Н. Горение углерода / Л.Н. Хитрин, О.А. Цуханова // Успехи физических наук: вып. 3. – М, 1950. – Т. 41. – С. 312-330.

2. Канторович, Б.В. Введение в теорию горения и газификации твердого топлива / Б.В. Канторович. – М: Государственное науч.-технич. издат-во литературы по черной и цветной металлургии, 1960. – 362 с.

3. Канторович, Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива: монография / Б.В. Канторович. – М.: Издат-во академии наук СССР, 1958. – 601 с.

4. Архипов, В.А. Движение частицы дисперсной фазы в несущей среде: учеб. пос./ В.А. Архипов, А.С. Устинина. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. – 252 с.

5. Рудаков, О.А. Определение параметров турбулентности потока газа в камере сгорания на основе интегрирования и преобразований уравнения Рейнольдса и Навье-Стокса / О.А. Рудаков, В.А. Митрофанов // Вестник Самарского гос. аэрокосмического университета. – 2002. – № 2. – С. 92-96.

6. Финягин, А.П. Влияние давления воздуха на процесс горения твердого топлива / А.П. Финягин, Н.И. Баринов, М.Н. Коробова // Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения. – М.: Наука, 1969. – С. 20-24.

7. Иванов, С.А. Газовая динамика: лабораторный практикум / С.А. Иванов. – Самара: Самар. гос. техн. университет, 2014. – 61 с.

8. Стариков, Ю.Н. Основы аэродинамики летательного аппарата: учеб. пос. / Ю.Н. Стариков, Е.Н. Коврижкин. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2004. – 151 с.

9. Соболев, А.А. Движение частицы в воздушном потоке / А.А. Соболев, П.А. Мельников, А.О. Тютюнник // Вектор науки ТГУ. – Томск: ТГУ. – 2011. – № 3 (17). – С. 82-86.

10. Пирумов, А.И. Аэродинамические основы инерционной сепарации / А.И. Пирумов. – М.: Государственное изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. – 124 с.

11. Гольдштик, М.А. Элементарная теория концентрированных дисперсных систем / М.А. Гольдштик, Б.Н. Козлов // Прикладная механика и теоретическая физика. – Новосибирск: Сибирское отделение Академии наук СССР, 1973. – № 4. – С. 67-77.

12. Мещерский, И.В. Работы по механике тел переменной массы / И.В. Мещерский. – М.: Государственной изд-во технико-теоретической литературы, 1952. – 281 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 14.01.2020