

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ХОДОВЫХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Г.И. Гедроть,

зав. каф. тракторов и автомобилей БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

С.В. Занемонский,

ст. преподаватель каф. тракторов и автомобилей БГАТУ

А.В. Бобрышов,

доцент каф. механики и компьютерной графики ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет», канд. техн. наук, доцент (г. Ставрополь, Российская Федерация)

С.И. Оскирко,

доцент каф. тракторов и автомобилей БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье приведены математическая модель и результаты аналитических исследований по обоснованию параметров ходовых систем транспортно-технологических сельскохозяйственных машин.

Ключевые слова: шина, грузоподъемность, деформация почв, сопротивление качению, ширина шин, количество осей.

The article presents the mathematical model and the results of analytical studies to validate the parameters of the drive system of transport and technological agricultural machinery.

Keywords: tire, carrying capacity, soil deformation, rolling resistance, tire width, number of axles.

Введение

В условиях современного сельского хозяйства увеличиваются площади сельскохозяйственных предприятий, расстояния транспортировки продукции, мощность используемых тракторов. У машинно-тракторных агрегатов, работающих с машинами для внесения органических и минеральных удобрений, прицепами, транспортировщиками рулонов, по одному следу проходят 4...5 колес, растет общая масса машин. Поэтому важно оценить показатели взаимодействия ходовых систем таких машин с опорным основанием и разработать рекомендации по их совершенствованию.

При теоретических исследованиях процесса взаимодействия колесных ходовых систем с почвой получили распространение плоские расчетные схемы, при которых колесо рассматривается единичной ширины, а форма проекции поверхности его контакта в плоскости опорного основания – в виде прямоугольника. В действительности процесс сложнее, пневматические шины имеют кривизну в поперечной плоскости, и это необходимо учитывать в расчетах [1, 2].

Цель настоящей работы – разработать рекомендации по совершенствованию ходовой системы для транспортно-технологической машины, агрегируемой с трактором тягового класса 3, на основании математической модели, комплексно учитывающей основные параметры шин и почв.

Основная часть

Поверхность контакта колеса с плоскостью можно представить в виде усеченного эллиптического параболоида [2, 3]. В этом случае поверхность контакта состоит из плоской зоны контакта, являющейся эллипсом или усеченным эллипсом и криволинейной, являющейся частью параболоида.

На рисунке 1 выделены несколько возможных областей в проекции поверхности контакта на плоскость опорного основания движущегося колеса. Принимаемое сочетание областей зависит от соотношения деформации почвы h , радиальной деформации шины λ и стрелы дуги протектора (высоты беговой дорожки) шины Δ . При небольшом погружении шин в почву ($h+\lambda\leq\Delta$) в расчетах учитываются все области (D_1, D_2, D_3, D_4, D_5), при погружении в почву протектора и частично боковин ($h+\lambda>\Delta$) не учитываются области D_5 , при значительных деформациях шин ($\lambda>\Delta$) и глубине следа учитываются только области D_1 и D_3 .

Расчет глубины следа h и составляющей силы сопротивления качению от деформации почвы $P_{fн}$ для любого колеса производится исходя из приведенных ниже выражений.

При деформации шин, меньших или равных значению стрелы дуги протектора шин ($\lambda\leq\Delta$), расчетные формулы имеют вид:

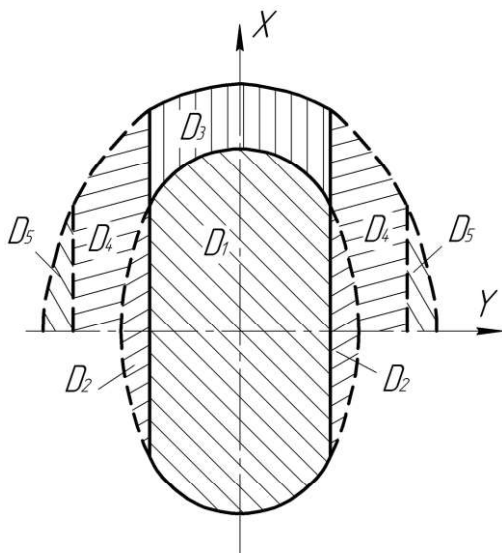


Рисунок 1. Проекция поверхности контакта шин на опорное основание

$$h = \frac{\sigma_0}{K} \operatorname{arth} \frac{G_{\text{пл}}}{\pi b_0 \sigma_0 \lambda} \sqrt{\frac{\Delta}{2R - \lambda}} - h_{s1}; \quad (1)$$

$$G = \frac{\pi b_0 \sigma_0^2}{2K} \sqrt{\frac{2R - h - \lambda}{\Delta}} \ln \frac{ch \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + h)}{ch \frac{K}{\sigma_0} h_{s1}} + G_{\text{пл}} -$$

$$- b_0 \sigma_0 \left(\sqrt{\frac{h + \lambda}{\Delta}} - 1 \right) \sqrt{(2R - h - \lambda)(h + \lambda - \Delta)} \cdot$$

$$\cdot th \frac{K}{\sigma_0} \left(\frac{5}{9} (h + \lambda - \Delta) + h_{s1} \right); \quad (2)$$

$$P_{f\text{п}} = 2 \frac{b_0 \sigma_0^2}{K} \ln \frac{ch \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + h + \lambda - \Delta)}{ch \frac{K}{\sigma_0} h_{s1}} +$$

$$+ \omega K b_0 \sqrt{\frac{h + \lambda}{\Delta}}, \quad (3)$$

где σ_0 – несущая способность почвы, $\text{H}/\text{м}^2$;
 K – коэффициент объемного смятия почвы, приведенный к размерам колеса, $\text{H}/\text{м}^3$;
 $2b_0$ – ширина беговой дорожки шины, м;
 R – свободный радиус колеса, м;
 h_{s1} – средняя остаточная глубина следа от предшествующих колес, м;
 ω – расчетный коэффициент, зависящий от параметров шины и контакта;

G – нормальная нагрузка на колесо, Н;

$G_{\text{пл}}$ – часть нагрузки, воспринимаемая в плоской части контакта шины с почвой, Н.

При деформации шин больших, чем стрела дуги протектора ($\lambda > \Delta$), расчеты выполняются по формулам:

$$h = \frac{\sigma_0}{K} \operatorname{arth} \frac{G_{\text{пл}}}{2b_0 \sigma_0 \sqrt{(2R - \lambda)\Delta}} \left(\sqrt{\frac{\lambda}{\Delta}} - 1 + \frac{\lambda}{\Delta} \arcsin \sqrt{\frac{\Delta}{\lambda}} \right) - h_{s1}; \quad (4)$$

$$G = \frac{\alpha b_0 \sigma_0^2}{K} \sqrt{\frac{2R - h - \lambda}{\Delta}} \ln \frac{ch \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + h)}{ch \frac{K}{\sigma_0} h_{s1}} + G_{\text{пл}}; \quad (5)$$

$$P_{f\text{н}} = \frac{2b_0 \sigma_0^2}{K} \ln \frac{ch \frac{K}{\sigma_0} (h_{s1} + h)}{ch \frac{K}{\sigma_0} h_{s1}}, \quad (6)$$

где α – расчетный коэффициент, зависящий от параметров шины и контакта.

Соответствующую составляющую силы сопротивления качению и суммарную силу сопротивления качению определяем по формулам:

$$P_{f\text{ш}} = K_{\text{ш}} B_{\text{к}} \lambda, \quad (7)$$

$$P_f = P_{f\text{п}} + P_{f\text{ш}}, \quad (8)$$

где P_f – сила сопротивления качению колеса, Н;

$P_{f\text{п}}$ – составляющая силы сопротивления качению из-за деформации почвы, Н;

$P_{f\text{ш}}$ – составляющая силы сопротивления качению из-за деформации шины, Н;

$B_{\text{к}}$ – ширина плоской зоны контакта шины с почвой, Н;

$K_{\text{ш}}$ – давление шины на дорогу при нулевом значении давления воздуха в шине, $\text{H}/\text{м}^2$.

При выполнении расчетов по приведенным формулам в первую очередь определяется глубина следа при совместном решении уравнений (1), (2) или (4), (5). Варьируя значениями λ и связанной с ними через характеристику шины на жестком основании нагрузкой $G_{\text{пл}}$, путем последовательных пересчетов, добиваемся равенства левой и правой частей уравнений (2) или (5).

Используя приведенные формулы, можно рассчитать глубину следа и силу сопротивления качению любого колеса, а путем суммирования составляющих – всего агрегата. Для первого колеса в формулах принимается $h_{s1} = 0$. Определение параметров, применяемых в модели, более подробно изложено в работах [2, 4, 5].

Аналитическое исследование влияния отдельных параметров шин на показатели взаимодействия с почвой показывает, что их улучшение в полевых условиях можно обеспечить как традиционным увеличением габаритов шин, так и улучшением их деформационных характеристик, уменьшением кривизны в поперечной плоскости.

Рассмотрим рациональные направления совершенствования ходовых систем транспортно-технологических машин на примере машин для внесения жидких органических удобрений (МВОУ), агрегируемых с трактором типа «БЕЛАРУС-2022» (тяговый класс 3). В качестве базовой принята машина МЖТ-Ф-11 грузоподъемностью 11 т, массой 3,95 т, которая оборудуется балансирной тележкой с четырьмя шинами 16,5/70-18, мод. КФ-97. Давление воздуха в шинах составляет 370 кПа.

Анализ конструкций МВОУ и возможности применения новых моделей шин типа 24,0/50-22,5, 700/50-22,5 [3, 5] показывает, что наибольший их диаметр составляет 1300 мм. Это ограничено поперечной устойчивостью машин и компоновочными соображениями. Принимаем постоянными: посадочный диаметр шин, стрелу дуги протектора и относительную деформацию шин. Их значения, исходя из проведенного анализа, принимаем равными 0,508 м (20 дюймов), 0,07 м и 0,23 м. Последний параметр, отражающий отношение допустимой деформации шины к высоте ее профиля, больше, чем у шины 16,5/70-18 на 14 %, что отражает указанную ранее целесообразность улучшения деформационных свойств шин.

Наиболее просто при принятых ограничениях варьировать шириной шин, так как это не требует принципиального изменения конструкции МВОУ. Допускаем, что колея машин соответствует колее трактора, а на сцепное устройство передается часть нагрузки от машины, равная 17 кН, отношение веса машины к грузоподъемности составляет 36 %. Последние два значения приняты исходя из параметров серийной машины. При заданных размерах шин и интервале отношения высоты профиля шины H к его ширине B в пределах 0,3...0,8 [6] интервал возможного изменения ширины профиля шин составляет 0,5...1,3 м.

На рисунке 2 приведены расчетные зависимости силы сопротивления качению и глубины следа машин разной грузоподъемности G_r , агрегируемых с трактором «БЕЛАРУС-2022», по слежавшейся зяби ($K = 10 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3$; $\sigma_0 = 8,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$) от ширины шин. Графики силы сопротивления качению (рис. 2а) построены из расчета движения агрегата на подъем с углом 3° .

Увеличение ширины шин в определенном интервале позволяет снизить силу сопротивления качению. При грузоподъемности 11 т такое снижение наблюдается до $B = 0,85 \text{ м}$, при грузоподъемности 13 т – до $B = 1,25 \text{ м}$, при грузоподъемности 14,5 и 16 т минимум силы сопротивления качению в исследованном интервале не установлен. Минимальное значение силы сопротивления качению машины грузоподъемностью 11 т в 1,6 раза ниже, чем у серийной (на рисун-

ках значения показателей серийной машины ограничены горизонтальной штриховой линией), грузоподъемностью 13 т – в 1,3 раза. Следовательно, для реализации равных тягово-сцепных свойств трактора, машины с ходовыми системами, оборудованными шинами низкого давления, имеют значительный резерв повышения грузоподъемности.

Примем за базовое значение силу сопротивления качению серийной машины, так как коэффициент загрузки двигателя трактора, агрегируемого с серийными МВОУ, составляет 70...90 %. Это в среднем соответствует предельному (80 %) на операции внесения удобрений [7]. Пересечение кривых изменения силы сопротивления качению со штриховой линией на рисунке 2а позволяет определить ширину шин и грузоподъемность МВОУ, обеспечивающих силу сопротивления качению, равную силе сопротивления качению серийной машины. Например, при $G_r = 14,5 \text{ т}$ ширина шины должна быть около 0,95 м. При максимальной ширине шины $B = 1,3 \text{ м}$ трактор «БЕЛАРУС-2022» можно агрегатировать с машиной грузоподъемностью около 15,0 т. Следовательно, благодаря совершенствованию ходовой системы, грузоподъемность

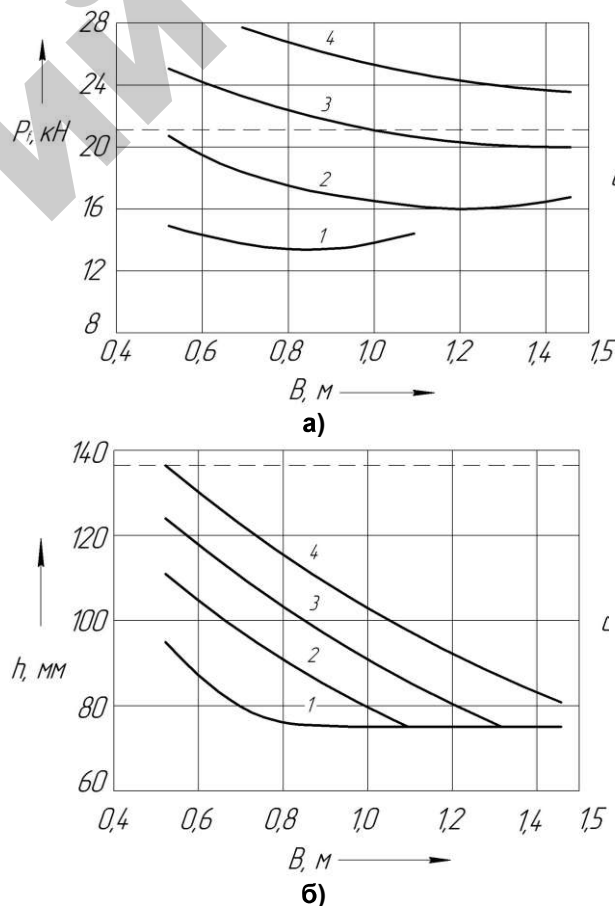


Рисунок 2. Зависимости силы сопротивления качению (а) и глубины следа (б) двухосной МВОУ, агрегируемой с трактором «БЕЛАРУС-2022» по слежавшейся зяби, от ширины шин и грузоподъемности машины: 1 – $G_r = 11 \text{ т}$; 2 – $G_r = 13 \text{ т}$; 3 – $G_r = 14,5 \text{ т}$; 4 – $G_r = 16 \text{ т}$

машины с традиционной компоновкой может быть увеличена в 1,3...1,4. Одновременно снижается деформация почвы в следах (рис. 2б). Так, при указанных выше грузоподъемности 14,5 т и ширине шин 0,95 м значение глубины следа составляет 0,092 м. Это ниже, чем у агрегата с серийной машиной в 1,5 раза. При ширине шин свыше одного метра, глубина следа для всех предлагаемых вариантов в основном определяется движителями трактора. Однако отметим, что ширина следов машины превышает ширину следа трактора (ширина шин 0,58 м).

С увеличением ширины шины увеличивается ее объем и, следовательно, заданная допустимая деформация шин обеспечивается при меньшем давлении воздуха. Выполненные расчеты показывают, что если в шинах шириной 0,5 м давление воздуха должно составлять 200 кПа, то в шинах шириной 1,3 м – 90 кПа. В связи с этим, по оценке авторов, значение коэффициента сопротивления качению МВОУ на дороге с асфальтированным покрытием составит соответственно 0,021 и 0,030. Для серийных машин в этих условиях значение указанного коэффициента составит 0,014. Однако определяющими являются почвенные условия.

Реализация предлагаемых технических решений ограничена компоновкой машин и нормативной документацией. Так, при выполнении транспортных работ по дорогам общего пользования, габарит машин по ширине не должен превышать 2,55 м. Обеспечить это возможно при внесении изменений в ходовую систему машин при ширине шин 0,55...0,70 м. Поэтому целесообразно рассмотреть изменение показателей взаимодействия с почвой ходовых систем с увеличенным количеством осей.

Результаты расчетов при заданных ранее параметрах для трехосных и четырехосных МВОУ приведены на рис. 3. В сравнении с двухосным вариантом трехосный и четырехосный позволяют снизить деформации почвы при всех нагрузках и ширине шин. При грузоподъемности четырехосной машины 16 т отмечается отсутствие дополнительных деформаций почвы по отношению к деформациям колесами трактора. В действительности они присутствуют из-за разрушения почвы после почвозацепов, перетирания почвы и др. [8]. Рост силы сопротивления качению для четырехосной МВОУ отмечается уже при значениях ширины колес, близких к 0,5 и 0,8 м, соответственно, при грузоподъемности машин 16 и 17,5 т. Это связано с тем, что глубина следов после прохода трактора теоретически не увеличивается. Основной рост силы сопротивления качению обусловлен возрастанием внутренних потерь в шинах и дополнительной деформацией из-за превышения ширины следов машины по отношению к следу трактора.

Можно предположить, что при принятых ограничениях в эксплуатации машин, наиболее рационально модернизировать ходовую систему серийной машины путем применения шин, шириной около 0,6 м в трехосном варианте грузоподъемностью до 16 т. При этом значение силы сопротивления качению машин в средних полевых условиях будет соответство-

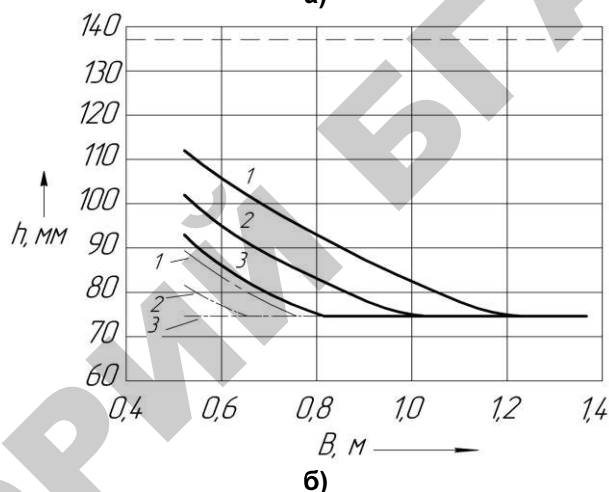
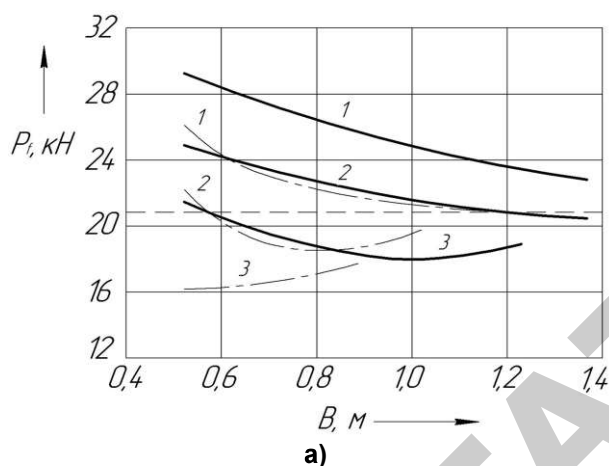


Рисунок 3. Зависимость силы сопротивления качения (а) и глубины следа (б) трехосной (---) и четырехосной (—) МВОУ, агрегируемых с трактором «БЕЛАРУС-2022», по слежавшейся язби от ширины колес и грузоподъемности:

1 – $G_r = 19$ т; 2 – $G_r = 17,5$ т; 3 – $G_r = 16$ т

вать серийным. Незначительно возрастают деформации почвы после трактора, не увеличивается уплотняемая площадь поля из-за разности ширины шин машины и трактора. Другие параметры шин должны соответствовать заданным: диаметр шин – 1,3 м; относительная деформация шин – 23 %; стрела дуги протектора – до 0,07 м.

Приведенная методика может быть применена для расчета любых транспортно-технологических машин в соответствующих условиях эксплуатации при заданных параметрах шин.

Заключение

Предложенные математические модели (1) – (6) позволяют рассчитать показатели взаимодействия с почвой многоосных агрегатов при различных размерах и конструктивных особенностях шин и нагрузках на колеса.

Модернизация двухосных ходовых систем МВОУ, агрегируемых с трактором тягового класса 3 путем увеличения ширины шин и снижения давле-

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 топок 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: