

## **К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ РАВНОМЕРНОСТИ ОБЪЕМНОГО ДОЗИРОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ**

Л. Я. СТЕПУК, д-р техн. наук, профессор;

В. Р. ПЕТРОВЕЦ, д-р техн. наук, профессор;

Н. И. ДУДКО, канд. техн. наук, профессор

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,  
Горки, Республика Беларусь

**Введение.** Современное сельское хозяйство невозможно без широкого применения химических веществ. Мировая практика свидетельствует о том, что 70 % урожая создается за счет средств химизации, половина этой величины приходится на минеральные удобрения [1–3]. Внесение всех видов минеральных удобрений и химических средств защиты растений состоит из двух процессов: дозирования и распределения. Причем у большинства машин дозирование является главным процессом, определяющим качество распределения удобрений. Существует два метода дозирования сельскохозяйственных материалов: объемный и весовой. Объемный метод дозирования основан на использовании устройств объемного принципа, а весовой – на использовании весовых устройств. Единственным преимуществом весового дозирования является более высокая точность, но только при сохранении постоянной объемной массы. Влажность сельскохозяйственных материалов в процессе их хранения непостоянна, меняется в зависимости от влажности окружающей среды. Изменение влажности приводит к изменению плотности. Объемные дозаторы подвержены меньшему влиянию изменения влажности материала в сравнении с весовыми, так как изменение влажности влияет на его объем в меньшей мере, чем на вес.

Объемные дозаторы одного и того же класса (сравнимой производительности) в 5–10 раз дешевле весовых, имеют более простое устройство, более высокую надежность в работе, меньшую трудоемкость обслуживания, более производительны по сравнению с весовыми дозаторами. Объемные дозаторы работоспособны на труднотекучих материалах и могут использоваться на мобильных машинах, испытывающих резкие динамические нагрузки, чего нельзя сказать о весовых дозаторах.

Процесс объемного дозирования следует рассматривать состоящим из трех фаз: фазы питания, или заполнения дозатора материалом; фазы формирования материала в равномерный поток и фазы выдачи материала из дозатора.

Фаза питания дозатора оказывает решающее влияние на устойчивость процесса дозирования вообще и зависит от устойчивости и равномерности процесса истечения материала из оперативных емкостей. Оперативная емкость, оснащенная побудителем истечения материала, является неотъемлемой частью дозирующей установки.

Фаза формирования материала в равномерный поток влияет на равномерность дозирования. Она находится в прямой зависимости от конструкции дозирующего рабочего органа. С целью получения высокой точности дозирования рабочий орган должен, взаимодействуя с материалом, формировать поток не только строго определенной формы и размеров, но и приводить его частицы к упаковке постоянной структуры, а значит, и плотности.

Фаза выдачи материала из дозатора практически не оказывает влияния на равномерность дозирования. В то же время она в значительной степени влияет на качество конечного продукта.

Однако исследований процессов дозирования сельскохозяйственных материалов с таким комплексным подходом в научной литературе обнаружить не удалось.

Наиболее часто в машинах для внесения минеральных удобрений применяются шиберные, кулачковые, штифтовые и ячеистые дозирующие устройства. Однако существующие дозаторы не обеспечивают точного дозирования материала, так как конструкции их далеко несовершенны. Очевидно, что без применения научных основ теории дозирования обеспечить требуемую точность не представляется возможным. Для равномерного дозирования надо формировать поток на выдачу не только строго определенной формы и размеров, но и определенной постоянной плотности. На это влияют многочисленные факторы, такие как высота столба над высевающим отверстием, форма и размеры этого отверстия, способ побуждения материала и др. Процесс дозирования в мобильных машинах для внесения удобрений нельзя рассматривать в отрыве от их технологической схемы. Поэтому разработка высокоточных дозаторов к машинам для внесения всех удобрений видов удобрений имеет большое научное и практическое значение.

**Постановка задачи и ее решение.** Непременным условием взаимодействия частиц в сыпучем теле является наличие между ними то-

чек контакта. Различают рабочие контакты, в которых возникают реактивные силы, определяющие устойчивость частиц в пространстве, и контакты касания, которые не участвуют в передаче усилий в сыпучей массе. Каждая пара частиц может иметь только один рабочий контакт. Связь эта может быть представлена сжимающей нормальной силой и касательной к поверхности контакта силой трения [4, 5, 6]. В этой связи представляют интерес исследования по изучению взаимного расположению частиц как круглой, так и некруглой формы.

При взаимном расположении частиц круглой формы (гранулированные удобрения) в процессе дозирования частицы участвуют в передаче усилий в сыпучей массе.

Каждая пара частиц может иметь только один рабочий контакт. Связь эта может быть представлена сжимающей нормальной силой и касательной к поверхности контакта силой трения.

В процессе дозирования материал вначале движется в бункере, затем – в зоне дозирования, где взаимодействует с рабочими органами, и, наконец, выдается сформированным потоком из дозатора. При этом частицы могут образовывать любую из возможных структур (с шестью, пятью, четырьмя, тремя и двумя контактами у каждой частицы). В этой связи большое практическое значение с целью обоснования принципа действия рабочего органа дозатора имеет вопрос определения вероятности каждой из этих структур с точки зрения статической их устойчивости. И. И. Кандауровым [7] показано, что структура из частиц с двумя рабочими контактами практически неустойчива. Частица, имеющая два контакта может перемещаться по направлению равнодействующей двух реактивных сил или вращаться, если реактивные силы на контактах неравны по величине и направлены в противоположные стороны, и лишь в случае, когда силы на контактах равны по величине и направлены навстречу друг другу, частицы находятся в статическом равновесии.

Для равновесия частиц с тремя рабочими контактами необходимо, чтобы сумма моментов сжимающих сил относительно какой-либо точки, а также сумма проекций всех сил на оси координат равнялись нулю. Статическое равновесие частиц возможно лишь при условии, когда линия действия заданной нагрузки проходит через центр круга и находится в пределах угла, образованного линиями действия опорных реакций. Следовательно, статическая устойчивость частицы зависит от взаимного положения рабочих контактов. Из рис. 1 а видно, что при  $0 \leq \alpha_n \leq \pi/3$  частица будет устойчива лишь при таком положении

точки приложения активной силы, когда линия действия ее находится в пределах угла  $\pi/3 + \alpha_n$ , заштрихованного на рисунке.

Взяв отношение угла, определяющего положение линии действия активной нагрузки при устойчивом состоянии частицы к углу, определяющему все возможные положения линии действия активной нагрузки, найдем вероятность устойчивого состояния частицы  $P_1(\alpha_n)$ .

Для  $0 < \alpha_n < \pi/3$  эта вероятность составляет:

$$P_1(\alpha_n) = \frac{\pi/3 + \alpha_n}{\pi - \alpha_n}, \quad (1)$$

где  $\alpha_n$  – угол, определяющий положение второго контакта.

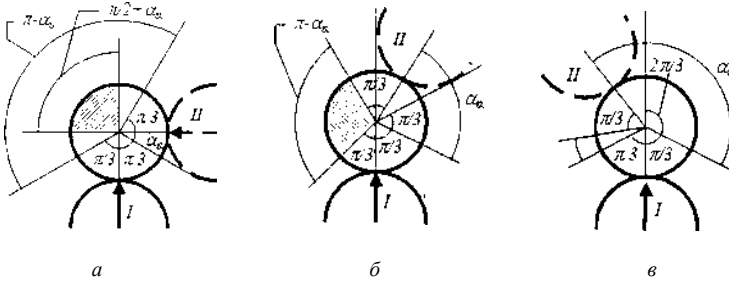


Рис. 1. Схема к расчету вероятности статической устойчивости частицы при трех рабочих контактах

Вероятность устойчивого положения при этом определяется как среднее значение, то есть

$$P_1 = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} P_1(\alpha_n) d\alpha_n. \quad (2)$$

Подставив полученное выражение в формулу (2), получаем:

$$P_1 = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} \frac{\pi/3 + \alpha_n}{\pi - \alpha_n} d\alpha_n = \int_0^{\pi/3} \frac{d\alpha_n}{\pi - \alpha_n} + \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} \frac{\alpha_n d\alpha_n}{\pi - \alpha_n} = 4 \ln 3/2 - 1 = 4 \cdot 0,41 = 0,64.$$

При расположении второго контакта в пределах  $\pi/3 \leq \alpha_n \leq \pi$  устойчивое положение частицы обеспечено при любом возможном приложении точки активной силы (рис. 1, в).

Для этого случая вероятность устойчивости частицы равна

$$P_2 = \frac{\pi - \alpha_n}{\pi - \alpha_n} = 1. \quad (3)$$

При положении второго контакта в пределах  $2\pi/3 \leq \alpha_n \leq \pi$  для третьего контакта нет ни у одной точки приложения активной силы, соответствующей устойчивому положению частицы (рис. 1, в). Вероятность устойчивого положения для этого случая:

$$P_3 = \frac{0}{\pi - \alpha_n} = 0. \quad (4)$$

Таким образом, при различном положении второго контакта у частицы будет различная вероятность статической устойчивости. В действительности второй контакт с одинаковой вероятностью может быть расположен в каждом из рассмотренных пределов. Следовательно, вероятность устойчивости частицы можно определить как среднее арифметическое значений вероятности устойчивости частицы при частных случаях расположения второго контакта, то есть имеем:

$$P_{\text{уч } 3} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} = \frac{0,64 + 1 + 0}{3} = 0,55.$$

Покажем вероятность статической устойчивости частиц с четырьмя рабочими контактами (рис. 2, а).

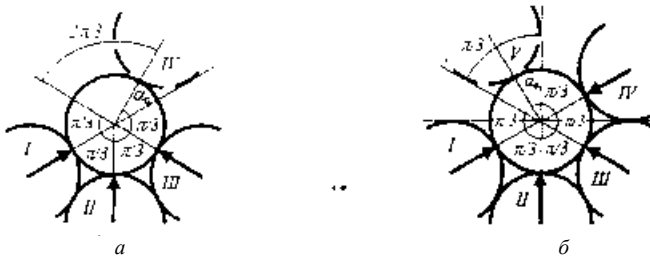


Рис. 2. Схема к расчету вероятности статической устойчивости частиц:  
а – при четырех рабочих контактах; б – при пяти рабочих контактах

Положение четвертого контакта определяется углом, который может изменяться от 0 до  $2\pi/3$ . В этих пределах изменения угла  $\alpha_n$  четвертый контакт с одинаковой вероятностью может быть расположен в любой точке на поверхности частицы. Следовательно, вероятность статической устойчивости частицы при наличии у нее четырех рабочих контактов равна

$$P_{\text{уч } 4} = \frac{2\pi/3}{2\pi/3} = 1.$$

Для частицы с пятью рабочими контактами положение пятого контакта определяется относительно закрепленных контактов углом  $\alpha$  (рис. 2, б), который может изменяться в пределах от 0 до  $\pi/3$ . При любом положении пятого контакта частица будет находиться в состоянии статического равновесия. Тогда вероятность статической устойчивости частицы при наличии у нее пяти рабочих контактов составляет

$$P_{\text{уч } 5} = \frac{\pi/3}{\pi/3} = 1.$$

Для частицы с шестью рабочими контактами вероятность статической устойчивости также равна единице.

Если за наиболее вероятное число контактов у частицы принять среднее арифметическое из числа всех возможных структурных образований, то получим, что наибольшей вероятностью обладает структура, у которой частицы имеют по четыре рабочих контакта, то есть

$$N_K = \frac{6 + 5 + 4 + 3 + 2}{5} = 4,$$

где  $N_K$  – среднее наиболее вероятное число рабочих контактов у частицы.

Обязательным условием для получения данной структуры упаковки частиц круглой формы является высота слоя дозируемого материала, превышающая в сумме три максимальных диаметра частиц.

Для плоской задачи расположение частиц некруглой формы (многокристаллические удобрения) можно представить в виде прямоугольников. Тогда задача ориентировки этих частиц в массиве сведется к определению вероятности того, какая из сторон прямоугольника займет горизонтальное положение. На положение частиц будут оказывать влияние их геометрические размеры, взаимодействие частиц друг с другом, инерционные силы при их движении, скорость движения и т. д.

Среди перечисленных факторов определяющими являются геометрические размеры частиц и положение центра тяжести каждой из них [5, 6, 7].

Рассмотрим изменение углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (рис. 3, а), определяющих положение частицы в момент касания что  $0 \leq \alpha_1 \leq \pi/2$ . В этих же пределах лежит и угол  $\alpha_2$  при этом они дополняют друг друга до  $\pi/2$ . Следовательно, мы можем рассматривать лишь один из них, например прилегающий к большей стороне частицы  $\alpha_2$  ею горизонтальной поверхности. При повороте частицы видно,

Из положения неустойчивого равновесия находят значение угла  $\alpha_2$ . Поскольку направление действия силы тяжести в данном случае совпадает с диагональю прямоугольника, то величину угла, определяющего это характерное состояние частицы, можно определить как отношение сторон

$$\alpha_2 = \arctg \frac{\alpha_1}{b_1}, \quad (5)$$

где  $\alpha_2$  – угол, определяющий положение неустойчивого равновесия частицы.

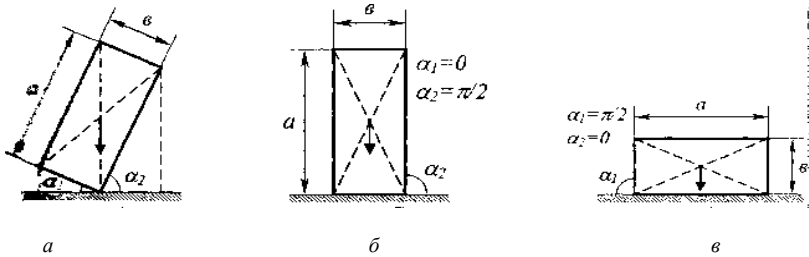


Рис. 3. Схема к определению вероятности положения частиц в массиве

При изменении этого угла от 0 до полученного значения части при дальнейшем падении будет ложиться на горизонтальную поверхность, своей большей стороной (рис. 3, в). Следовательно, вероятность того, что частица будет опираться на горизонтальную поверхность, определится выражением:

$$P_6 = \frac{2}{\pi} \arctg \frac{\alpha_1}{b_1}. \quad (6)$$

Вероятность же того, что частица будет опираться на горизонтальную плоскость меньшей стороной, равна (рис. 3, б)

$$P_m = 1 - P_6 = 1 - \frac{2}{\pi} \arctg \frac{\alpha_1}{b_1} \quad (7)$$

Из полученного выражения видно, что по мере относительного увеличения геометрических размеров частиц вероятность их укладки большей стороной возрастает. Так, при  $\alpha_1/b_1 \rightarrow \infty$  или  $b_1 \rightarrow 0$  вероятность  $P_6 \rightarrow 1$ . Из этого следует, что частицы прямоугольной формы будут стремиться занять горизонтальное положение.

Таким образом, для обеспечения постоянной упаковки сыпучего тела с частицами некруглой формы (в нашем случае – крупнокристал-

лические удобрения) необходимо приведение его в разрыхленное состояние.

Минеральные удобрения характеризуются порозностью (пористостью), которая определяется по формуле

$$п = 1 - \frac{\rho_c}{\rho_s},$$

где  $п$  – порозность удобрения;

$\rho_c$  – плотность сложения («скелет удобрения»), г/см<sup>3</sup>;

$\rho_s$  – плотность твердой фазы удобрения, г/см<sup>3</sup>.

Отношение объема пор  $V_{п}$  к объему твердой фазы  $V_s$  называется коэффициентом порозности удобрения, т. е.

$$\varepsilon = \frac{V_{п}}{V_s} = \frac{\rho_s}{\rho_c} - 1.$$

При дозировании сыпучий материал должен быть приведен к критической порозности. Это достигается приложением к структуре вертикального давления «метод компрессии»; сообщением частицам структуры вибрационных движений; приложением сдвигающей силы. В процессе сдвига несвязанного материала устанавливается некоторое постоянное значение пористости (порозности) называемое критической порозностью.

**Выводы.** 1. Обязательным условием для получения структурной упаковки частиц круглой формы является высота слоя дозируемого материала, превышающая в сумме три максимальных диаметра частиц.

2. Для обеспечения постоянной упаковки сыпучего тела с частицами некруглой формы (крупнокристаллические удобрения) необходимо приведение его в разрыхленное состояние.

3. При дозировании материалы, имеющие пористость меньше критической, при сдвиге должны быть разрыхлены, а более рыхлые – уплотнены.

4. Фаза формирования материала в равномерный поток влияет на равномерность дозирования, при этом она зависит от конструкции дозирующего рабочего органа.

5. Для получения высокой точности дозирования рабочий орган, взаимодействуя с материалом, должен создавать поток не только строго определенной формы и размеров, но и приводить его частицы к формированию определенной постоянной структуры, а значит – плотности [8].



## ЛИТЕРАТУРА

1. Степук, Л. Я. Технологии и машины для внесения минеральных удобрений: монография / Л. Я. Степук, Н. И. Дудко, В. Р. Петровец. – Горки: БГСХА, 2010. – 260 с.
2. Дудко, Н. И. Ресурсосберегающие технологии и машины для внесения минеральных удобрений и посева зерновых культур / Н. И. Дудко, В. Р. Петровец. – Горки: БГСХА, 2011. – 296 с.
3. Герсевич, Н. М. Теоретические основы механики грунтов и их практического применения / Н. М. Герсевич, Д. Е. Польшин. – М.: Стройиздат, 1948.
4. Степук, Л. Я. Механизация получения и применения многокомпонентных сельскохозяйственных материалов / Л. Я. Степук. – Минск: Ураджай, 1991. – 311 с.
5. Степук, Л. Я. Повышение качества приготовления и эффективности применения полидисперсных сельскохозяйственных материалов путем совершенствования процессов дозирования и разработки новых дозирующих устройств: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Л. Я. Степук. – Минск, 1991. – 401 с.
6. Кандауров, И. И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве / И. И. Кандауров. – М.: Стройиздат, 1966. – 225 с.
7. Адамчук, В. В. Теория центробежных рабочих органов машин для внесения минеральных удобрений / В. В. Адамчук. – К.: Аграрная наука, 2010. – 178 с.
8. Степук, Л. Я. Научные предпосылки к созданию высокоточных объемных дозаторов непрерывного действия / Л. Я. Степук, В. В. Миккульский // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т., Минск, 21–22 окт. 2015 г. / РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства»; редкол.: П. П. Казакевич (гл. ред.), С. Н. Поникарчук. – Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2015. – Т. 1. – С. 105–116.

УДК 631.33.024.

## АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ СОШНИКОВ

А. А. СЫСОЕВ, ст. преподаватель, магистр техн. наук  
УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,  
Горки, Республика Беларусь

**Введение.** При возделывании сельскохозяйственных культур важнейшее значение имеет посев. Качество этой операции определяется техническим состоянием посевных машин, их настройкой и регулировкой, соблюдением агротехнических требований. Как известно, сошник – это важнейшая деталь сеялки, непосредственно взаимодействующая с почвой и создающая в ней «разрез», куда высеваются семена и удобрения.

**Основная часть.** От качества заделки семян в почву в значительной мере зависят их всхожесть и развитие растений. Поэтому сошники должны удовлетворять следующим основным агротехническим требо-