

ФАКТОРЫ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕГО РЕЖИМА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ СМЕСИ В АППАРАТЕ С ЛОПАСТНОЙ МЕШАЛКОЙ

Н.А. Чернецкая, Ю.А. Шапошников

Рассмотрен процесс перемешивания туков минеральных удобрений с водой в горизонтальном аппарате с радиальной лопастной мешалкой. Получено решение уравнения относительного движения туков с учетом сопротивления среды, позволяющее определить траектории движения частицы, сходящей с лопасти, при различных кинематических режимах. Выявлены ресурсосберегающие факторы процесса приготовления питательной смеси.

Ключевые слова: перемешивание, лопасть, мешалка, туки, смесь, режим, движение, траектория.

Использование минеральных удобрений в тепличном хозяйстве связано с затратами материальных и энергетических ресурсов. Внесение каждого килограмма удобрений должно обеспечивать максимальную отдачу. Осуществить это можно лишь используя один из эффективных способов внесения питательных смесей. Отечественная и зарубежная практика убедительно свидетельствует о том, что при внесении удобрений с поливной водой можно получить более высокие урожаи сельскохозяйственных культур, чем при раздельном внесении тех же доз удобрений и тех же поливных нормах.

Питательные смеси наиболее удобно и выгодно производить путем механического перемешивания сухих минеральных удобрений с поливной водой. Механическое перемешивание создает большую турбулентность потока жидкости, необходимую для того, чтобы все частицы туков находились в жидкости во взвешенном состоянии и не выходили бы из зоны активного перемешивания, чего достаточно для обеспечения растворения туков [1]. Кроме того, производится механическое воздействие на твердую фазу. Это активизирует процесс растворения твердых туков в воде, которые без внешнего воздействия (особенно фосфорные удобрения) растворяются очень медленно.

Механизированное приготовление смесей повышает себестоимость тепличной продукции. Необходимо найти условия ресурсосберегающего процесса, обеспечивающего минимальные затраты энергии при сохранении высокого качества питательной смеси.

С этой целью рассмотрен процесс перемешивания туков с водой в горизонтальном аппарате с радиальной лопастной мешалкой. Задача сводится к исследованию поведения

твердой частицы туков сходящей с лопасти при перемешивании, т.е. рассмотреть ее траекторию с учётом, что частица туков совершает движение в жидкой среде, выявить влияющие факторы, а также выбрать наилучший режим работы аппарата.

Горизонтальный аппарат с лопастной мешалкой обеспечивает все, вышеуказанные, качества процесса перемешивания, а также отличается простотой конструкции и малой стоимостью. Лопастная мешалка обеспечивает высокую эффективность перемешивания при работе в системе «жидкость - твердое тело» при малых затратах мощности. Горизонтальное расположение оси рабочего органа в аппарате обеспечивает активное перемешивание без мертвых зон [2].

Процесс перемешивания в аппарате осуществляется следующим образом. Лопастная мешалка, вращаясь, создает турбулентный поток жидкости, лопастями поднимает туки со дна емкости и вводит их в активный процесс. Частота вращения мешалки должна обеспечивать распределение туков по всему объему перемешиваемой смеси, т.е. сход туков с лопасти. При этом туки, сойдя с лопасти, увлекаются турбулентным потоком жидкости и продолжают движение в емкости, что способствует их активному растворению.

Рассмотрим движение частицы туков по лопасти, установленной радиально на валу мешалки. Схема сил, действующих на частицу, находящуюся на лопасти, показана на рисунке 1. На частицу действуют силы: движущая сила P , под действием которой частица осаждается; центробежная сила F_u , зависящая от угловой скорости ω_0 ; сила трения F_{mp} частицы о лопасть; реакция лопасти N .

ФАКТОРЫ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО РЕЖИМА ПРИГОТОВЛЕНИЯ
ПИТАТЕЛЬНОЙ СМЕСИ В АППАРАТЕ С ЛОПАСТНОЙ МЕШАЛКОЙ

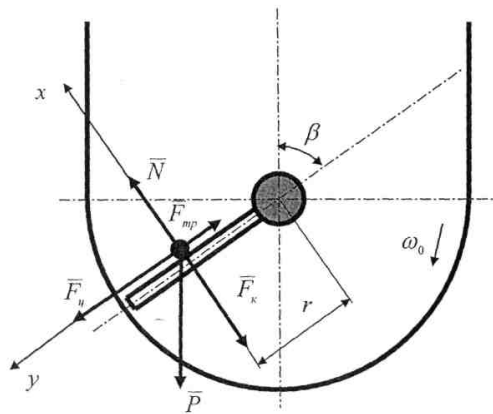


Рисунок 1 - Схема сил, действующих на частицу, находящуюся на лопасти

С учетом сопротивления среды, движущая сила P , под действием которой частица осаждается, определена как разность между силой тяжести частицы G и подъемной силой A .

Определяется по формуле:

$$P = G - A = \frac{\pi d^3 \rho_m g}{6} - \frac{\pi d^3 \rho g}{6} = \frac{\pi d^3 g (\rho - \rho_m)}{6}, \quad (1)$$

где d - диаметр частицы; g - ускорение свободного падения; ρ, ρ_m - плотность соответственно частицы и жидкости.

Центробежная сила F_u равна:

$$F_u = \frac{\pi d^3 \rho_m}{6} \omega_0^2 r, \quad (2)$$

где r - расстояние между частицей и осью вращения.

Сила инерции F_k от поворотного ускорения

$$F_k = \frac{\pi d^3 \rho_m}{3} \omega_0 \frac{dy}{dt}. \quad (3)$$

Уравнения относительного движения частицы по оси y , направленной вдоль лопасти, и по оси x , направленной перпендикулярно к лопасти, имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\pi d^3 \rho_m}{6} \frac{d^2 y}{dt^2} = P \cos \beta + F_u - F_{mp} \\ \frac{\pi d^3 \rho_m}{6} \frac{d^2 x}{dt^2} = N - P \sin \beta - F_k \end{cases}, \quad (4)$$

где α - угол поворота лопасти.

Если частица по лопасти движется без отрыва, то ускорение, направленное по оси x будет равно нулю ($d^2 x / dt^2 = 0$), тогда система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{\pi d^3 \rho_m}{6} \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{\pi d^3 g (\rho - \rho_m)}{6} \cos \beta + \frac{\pi d^3 \rho_m}{6} \omega_0^2 r - f_1 N \\ N = \frac{\pi d^3 g (\rho - \rho_m)}{6} \sin \beta + \frac{\pi d^3 \rho_m}{3} \omega \frac{dy}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

где f_1 - коэффициент трения частицы о поверхность лопасти.

Под действием лопасти частица может преимущественно находиться в состоянии покоя относительно лопасти и участвовать только в переносном движении, или частица может выйти из состояния покоя и начать движение по лопатке. Частица может начать двигаться по лопатке в том случае, если проекция сил, способствующих движению, на направление движения больше проекции сил, препятствующих этому движению.

Учтем, что $r = r_e + y$ (r_e - расстояние от оси вращения до слоя туков), тогда центробежная сила будет состоять из двух слагаемых:

$$\frac{\pi d^3 \rho_m}{6} \omega_0^2 r_e + \frac{\pi d^3 \rho_m}{6} \omega_0^2 y. \quad (6)$$

Проведя преобразования, получим неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\ddot{y} + 2f_1 \omega_0 \dot{y} - \omega_0^2 y = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_m} \right) \cos \beta + \omega_0^2 r_e - f_1 g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_m} \right) \sin \beta \quad (7)$$

Решение уравнения (7) после преобразований имеет вид [3]:

$$\begin{aligned} y &= c_1 e^{\kappa_1 t} + c_2 e^{\kappa_2 t} + \frac{g(1-\rho/\rho_m)}{2\omega_0^2(1+f_1^2)} \times \\ &\times [\cos(\beta_0 + \omega_0 t)(f_1^2 - 1) + 2f_1 \sin(\beta_0 + \omega_0 t)] - r_e \\ \dot{y} &= c_1 \kappa_1 e^{\kappa_1 t} + c_2 \kappa_2 e^{\kappa_2 t} + \frac{g(1-\rho/\rho_m)}{2\omega_0^2(1+f_1^2)} \times \\ &\times [\sin(\beta_0 + \omega_0 t)(1-f_1^2) + 2f_1 \cos(\beta_0 + \omega_0 t)] \end{aligned} \quad (8)$$

Постоянные интегрирования c_1 и c_2 (начальные условия: $t = 0, \beta = \beta_0, y = 0, \dot{y} = 0$):

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{g(1-\rho/\rho_m)}{2\omega_0^2(1+f_1^2)} [\cos \beta_0 (1-f_1^2) - 2f_1 \sin \beta_0] + r_e - c_2 \\ c_2 &= \frac{\left[\frac{g(1-\rho/\rho_m)}{2\omega_0^2(1+f_1^2)} \left[\cos \left(\frac{\kappa_1}{\omega_0} - \frac{f_1^2 \kappa_1}{\omega_0} + 2f_1 \right) - \right. \right. \\ &\left. \left. - \sin \beta_0 \left(\frac{2f_1 \kappa_1}{\omega_0} + f_1^2 - 1 \right) \right] + r_e \kappa_1}{(\kappa_1 - \kappa_2)} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Полученное решение позволяет определить траектории абсолютного движения час-

тицы, сходящей с лопасти, при различных кинематических режимах. На рисунке 2 приведены траектории частиц, для параметров мешалки: диаметр вала $d = 0,05 м$, диаметр мешалки $0,34 м$, $r_g = 0,07 м$, плотность частицы туков $\rho_m = 1127 кг/м^3$; коэффициент трения частицы о материал лопасти в жидкости $f_1 = 0,35$.

Частоту вращения мешалки определим из условия равенства центробежной силы и силы тяжести частицы с учетом того, что частица движется в жидкости. Тогда после преобразований получим, что

$$\omega_0 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g(1 - \rho/\rho_m)}{R_x}} \quad (10)$$

При выполнении этого условия частица не будет сходить с лопасти в течение оборота (для исследуемого аппарата $\omega_0 = 2,5 с^{-1}$, $n = 24,3 мин^{-1}$). Для того чтобы частица сходила с лопасти нужно увеличивать частоту вращения мешалки. Расчет траектории частицы при $n = 25 мин^{-1}$ и $n = 30 мин^{-1}$ показал, что частица остается на лопасти. При $n \geq 40 мин^{-1}$ частица сходит с лопасти, и конечный угол поворота лопасти уменьшается с увеличением частоты вращения (рисунок 2).

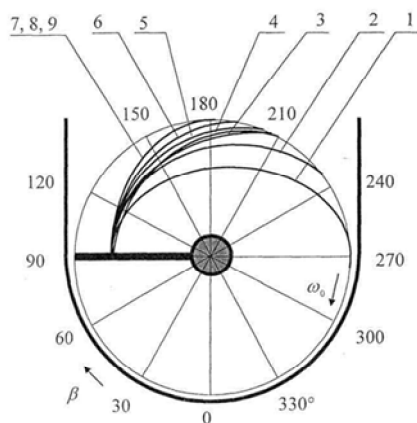


Рисунок 2 - Траектория движения частицы при $\rho = 1000 кг/м^3$ и частоте вращения мешалки: 1- $40 мин^{-1}$; 2- $50 мин^{-1}$; 3- $60 мин^{-1}$; 4- $70 мин^{-1}$; 5- $80 мин^{-1}$; 6- $90 мин^{-1}$; 7- $100 мин^{-1}$; 8- $110 мин^{-1}$; 9- $120 мин^{-1}$

Из рисунка видно, что при частоте вращения $n = 40 мин^{-1}$ частица сходит с лопасти при угле поворота $\beta = 274^\circ$. Это значит, что частица будет быстро оседать на дно, мало взаимодействуя с жидкостью. При $n = 50 мин^{-1}$

частица сходит с лопасти, когда угол поворота составляет $\beta = 232^\circ$, т.е. частицы сходят с лопасти около стенки емкости и будут концентрироваться в пристеночной области. При $n \geq 60 мин^{-1}$ частица сходит с лопасти, повернутой на угол β от 200° до 213° . Значит, сойдя с лопасти, она будет перемещаться в жидкости вниз и увлекаться вращающейся жидкостью. Это обеспечит взаимодействие частицы с жидкостью, и будет способствовать более быстрому растворению. Из рисунка 2 видно, что при увеличении числа оборотов от $100 мин^{-1}$ до $120 мин^{-1}$ частица сходит с лопасти при одном и том же угле 200° . Следовательно, такое увеличение будет нерациональным, потому, что мощность, затрачиваемая на перемешивание, будет увеличиваться, а процесс растворения не будет ускорен.

На траекторию частицы оказывает влияние плотность жидкости. Так как она изменяется по ходу растворения, то траектория частицы тоже будет изменяться. Зависимость угла поворота лопасти, при котором частица сходит, от плотности раствора показана на рисунке 3. Из графика видно, что при увеличении плотности раствора угол поворота, при котором частица сходит с лопасти, уменьшается, и его диапазон значительно сужается для различных частот вращения мешалки.

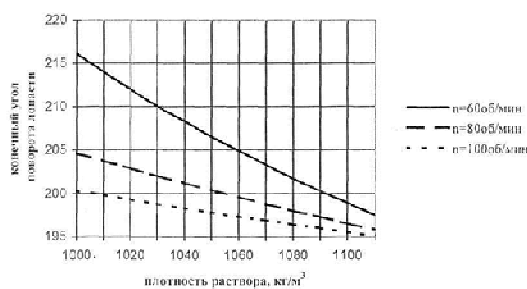


Рисунок 3 - Зависимость конечного угла поворота лопасти β от плотности раствора ρ

Следовательно, наиболее эффективно частица будет перемещаться во вращающейся жидкости при частоте вращения мешалки, изменяющейся в пределах от $60 мин^{-1}$ до $100 мин^{-1}$. При увеличении плотности раствора конечный угол поворота лопасти уменьшается до 195° для всех рассматриваемых частот вращения мешалки. Частоту вращения мешалки в ходе приготовления питательного раствора следует понижать с $100 мин^{-1}$ до $60 мин^{-1}$. Процесс приготовления смеси туков

ФАКТОРЫ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО РЕЖИМА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ СМЕСИ В АППАРАТЕ С ЛОПАСТНОЙ МЕШАЛКОЙ

с водой в таком режиме работы будет осуществляться с меньшими затратами энергии.

Снижение расхода ресурсов происходит за счет того что частицы туков, сойдя с лопасти, будет увлекаться вращающейся жидкостью, взаимодействовать с жидкостью, что будет способствовать более быстрому растворению. Нерастворимая часть равномерно распределяется по всему объему смеси. Каждая дозированная в поливную воду порция полученной смеси будет иметь одинаковую концентрацию питательных веществ, соответствующую агротехническим требованиям, и способствует получению высоких урожаев возделываемых тепличных культур.

Выводы

1. Траектория движения твердой частицы туков, сходящей с лопасти, зависит от факторов кинематического режима мешалки и плотности раствора:

- конечный угол поворота лопасти прямо пропорционален частоте вращения мешалки;
- конечный угол поворота лопасти обратно пропорционален плотности раствора.

2. Условиям ресурсосберегающего процесса, обеспечивающего минимальные затраты энергии при сохранении высокого качества питательной смеси соответствует режим работы аппарата при частоте вращения мешалки в пределах от 100 мин^{-1} до 60 мин^{-1} . Приготовленная смесь жидких минеральных удобрений будет иметь равномерное распределение всех питательных веществ в соответствии с агротехническими требованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернецкая Н.А., Шапошников Ю.А. Совершенствование аппарата с лопастной мешалкой по критериям ресурсосбережения. // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2011». Том 4. Технические науки. – Одесса, 2011.– С. 49–51.

2. Чернецкая Н.А., Шапошников Ю.А. Результаты совершенствования конструкции аппарата для приготовления жидких удобрений. // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки № 9 (213) – Новосибирск, 2010. – С. 87–90.

3. Чернецкая Н.А., Фокеев А.К. Исследование движения частицы в аппарате с механической мешалкой. // Известия ТулГУ. Сер. Проблемы сельскохозяйственного машиностроения. Вып. 2. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2005.– С. 25–31.

Чернецкая Н.А., к.т.н., доцент

e-mail: Hatajib9_a@mail.ru

*Шапошников Ю.А., д.т.н., профессор
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова»*