

ЭФФЕКТИВНАЯ ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ГРАНУЛЫ В ЛОПАСТНОМ СМЕСИТЕЛЕ

Ю.А. Шапошников, Н.А. Чернецкая

Рассмотрен процесс получения смеси гранул минеральных удобрений с поливной водой в горизонтальном аппарате с радиальным лопастным смесителем. Приведены характеристики взаимодействия гранулы и лопасти смесителя. Представлен анализ траектории перемещения гранулы при захвате ее лопастью.

Ключевые слова: смесь, гранула, смеситель, лопасть, вал, угол, вращение, скорость, процесс, перемешивание, режим, контакт, траектория.

Повысить эффективность процесса получения смеси гранул минеральных удобрений с поливной водой возможно посредством применения аппарата, представляющего собой радиальный лопастной смеситель. Лопасти на валу установлены по винтовой линии; длина лопасти составляет не менее 90% радиуса основания емкости; ширина лопасти равна диаметру вала мешалки. Лопасти равномерно распределяются по длине вала, с возможностью изменения их количества и угла (φ) наклона лопасти к плоскости вращения. При вращении вала смесителя каждая лопасть перемещается в некотором объеме, равном диаметру смесительной емкости и ширине лопасти.

Гранулы находятся в контакте с поверхностью лопасти, а именно, перемещаются по определенной траектории, затем сходят с лопасти, продолжая участвовать в перемешивании (увлекаются потоком жидкости), попадают на другую лопасть, перемещаются по ее поверхности, сходят и продолжают такое перемещение по лопастям до растворения [1]. Таким образом, задача сводится к выявлению режима работы смесителя, при котором гранула как можно дольше будет находиться в контакте с лопастью.

В соответствии с поставленными задачами, определили величины параметров процесса (мощности (N), затрачиваемой на процесс перемешивания, удельной производительности (k) аппарата, времени (t) перемешивания) в зависимости от факторов (частоты вращения (n) мешалки, угла (α) постановки лопасти к плоскости вращения, живого сечения (f) лопасти, числа (z) лопастей). Параметры и факторы процесса перемешивания представили в виде безразмерных критериев, что позволит полученные

результаты распространять на подобные явления.

Развернутый вид данных критериальных зависимостей следующий [2]:

- Затраты мощности выразили - критерием Эйлера (Eu):

$$Eu = \frac{N}{d^5 n^3 \rho}; \quad (1)$$

- Качество смеси - критерием Дьяконова (Di):

$$Di = \frac{k}{n}; \quad (2)$$

- Затраты времени - безразмерным критерием (T):

$$T = tn; \quad (3)$$

- Частоту вращения мешалки - критерием Рейнольдса (Re):

$$Re = \frac{d^2 n \rho}{\eta}, \quad (4)$$

где d - диаметр мешалки; ρ - плотность раствора; η - динамическая вязкость водного раствора.

Проведение экспериментальных исследований и обработка результатов осуществлялась при помощи методик теории планирования эксперимента. В процессе исследований были применены следующие уровни и интервалы варьирования факторов [3]:

- $X_1 = Re$ - в пределах от $6,35 \cdot 10^5$ до $10,6 \cdot 10^5$ с интервалом варьирования $2,12 \cdot 10^5$;

- $X_2 = \alpha$ - в пределах от 10° до 90° с интервалом 40° ;

- $X_3 = f$ - в пределах от 0,24 до 0 с интервалом 0,12;

ЭФФЕКТИВНАЯ ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ГРАНУЛЫ В ЛОПАСТНОМ СМЕСИТЕЛЕ

- $X_4 = z$ - в пределах от 8 до 24 с интервалом варьирования 8.

В результате регрессионного анализа, после удаления незначимых коэффициентов регрессии и проверки модели на адекватность, получили следующие зависимости [3]:

$$Y_1 = 97,165 - 61,193X_1; \quad (5)$$

$$Y_2 = 0,190 - 0,033X_1 + 0,012X_4; \quad (6)$$

$$Y_3 = 1819,792 + 357,292X_1 - 24,792X_3 - 40,208X_4 \quad (7)$$

Таким образом, получили модель процесса перемешивания.

Уравнения (5), (6), (7) в расшифрованном виде, т.е. со значениями коэффициентов, соответствующих действительным значениям факторов процесса принимают вид:

$$Eu = 341,217 - 3 \cdot 10^{-4} Re; \quad (8)$$

$$Di = 0,3 - 4 \cdot 10^{-7} Re + 1,5 \cdot 10^{-3} z; \quad (9)$$

$$T = 615,731 + 1,7 \cdot 10^{-3} Re - 165,278f - 5,026z \quad (10)$$

Полученные уравнения показывают, что критерий Рейнольдса, характеризующий частоту вращения мешалки, оказывает влияние на все параметры процесса, в то время как число лопастей влияет только на удельную производительность и время перемешивания и не влияет на мощность, затрачиваемую на перемешивание, а живое сечение лопасти сказывается только на удельной производительности аппарата с механическим перемешивающим устройством.

По полученным результатам построены графики зависимости параметров от критерия Рейнольдса [3]. На рисунке 1 приведена зависимость мощности от частоты вращения мешалки, угла постановки лопасти к плоскости вращения и числа лопастей, выраженная в безразмерной форме, т.е. зависимость Eu от Re . Результаты получены при различных сочетаниях факторов.

Из графиков следует, что значение мощности, затрачиваемой на перемешивание, зависит от частоты вращения мешалки и числа лопастей. Изменение угла постановки лопасти к плоскости вращения мешалки и

величины живого сечения лопасти незначительно сказываются на величине мощности.

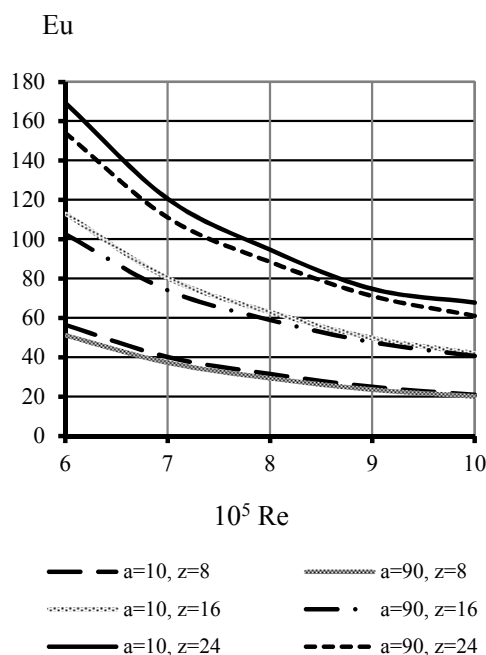


Рисунок 1 - Зависимость критерия Эйлера (Eu) от критерия Рейнольдса (Re)

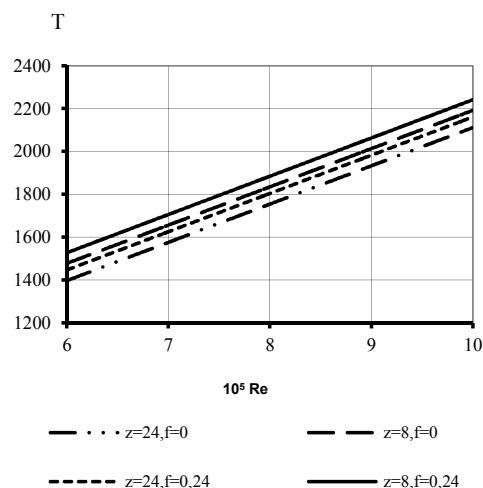


Рисунок 2 - Зависимость критерия времени (T) от критерия Рейнольдса (Re)

Время перемешивания, выраженное безразмерным критерием T сокращается с увеличением частоты вращения мешалки [3], выраженной безразмерным критерием Re ,

для мешалок с различным количеством и конструкциями лопастей (рис. 2).

Для построения динамической модели взаимодействия частицы и лопасти рассмотрели схему (рисунок 3) относительного движения частицы по поверхности плоской лопасти при вращении мешалки [4].

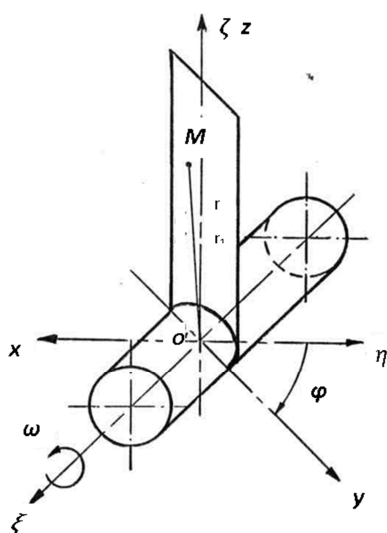


Рисунок 3 - Динамическая модель взаимодействия частицы и лопасти

Неподвижная система координат $K_0(0\xi\eta\zeta)$ связана с осью вращения лопастного вала, а подвижная система координат $K_1(0xyz)$ связана с лопастью и вращается вместе с ней.

Движение центра масс M частицы является относительным в системе K_1 , переносным - вместе с лопастью, абсолютным по отношению к системе K_0 . Положение точки M относительно подвижной системы отсчета определяется радиус-вектором \vec{r} , проведенным в точку M из начала этой системы O , или тремя координатами x, y, z в этой системе:

$$\vec{r} = \vec{i}x + \vec{j}y + \vec{k}z \quad (11)$$

Начало отсчета времени t соответствует моменту встречи частицы с лопастью в начальной точке соединения лопасти и вала.

На частицу находящуюся, на вращающейся лопасти действуют следующие силы: P - вес частицы; N - реакция поверхности лопасти; F_T - сила трения частицы по по-

верхности лопасти; Φ_K - сила инерции Кориолиса; Φ_U - относительная сила инерции.

С учетом уравнения лопасти, которое записано в начальных условиях для координат $y = 0$ и $\dot{y} = 0$, а также текущих преобразований, уравнения движения точки имеют вид [4]:

$$\left\{ \begin{aligned} m\ddot{x} &= -f|N| \frac{\dot{x} + \omega \cos\varphi z}{\sqrt{(\dot{x} + \omega \cos\varphi z)^2 + (\dot{z} - \omega \cos\varphi x)^2}} + \\ &+ m\omega^2 \cos^2\varphi x - 2m\omega \cos\varphi \dot{z} \\ |N| &= -m\omega^2 \sin\varphi \cos\varphi x + 2m\omega \sin\varphi \dot{z} \\ m\ddot{z} &= -mg - f|N| \frac{\dot{z} - \omega \cos\varphi x}{\sqrt{(\dot{x} + \omega \cos\varphi z)^2 + (\dot{z} - \omega \cos\varphi x)^2}} + \\ &+ m\omega^2 z + 2m\omega \cos\varphi \dot{x} \\ x &= x_0, \quad -r \leq x_0 \leq r \\ z &= \sqrt{r^2 - x_0^2 \cos^2\varphi} \\ \dot{x}_0 &= \omega \cos\varphi z_0 \\ \dot{z}_0 &= -\omega \cos\varphi x_0 \end{aligned} \right. \quad (12)$$

Систему дифференциальных уравнений решили с применением компьютерной системы проведения математических расчетов MatLAB путем интегрирования методом Рунге-Кутты 4-го порядка. В результате получили координаты $x(t)$ и $z(t)$ частицы на лопасти,

проекции скорости частицы $\frac{dx(t)}{dt}$ и $\frac{dz(t)}{dt}$ на координатные оси, абсолютную скорость $V(t)$, а также путь $S(t)$ при различных значениях угловой скорости ω вала, угла φ наклона лопасти к плоскости вращения и в различные моменты времени t .

Анализ поведения гранулы при захвате ее лопастью показывает, что рациональная угловая скорость вала, работающего в объеме $5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ смеси, находится в пределах от $\omega = 6,28$ рад/с до $\omega = 10,47$ рад/с. В таком режиме работы гранула перемещается по лопасти при повороте вала до угла $\varphi = 200^\circ$ от нижнего вертикального положения лопасти в смесительной емкости, и затем сходит с нее и увлекается вращающейся средой. Это обеспечит взаимодействие гранулы с жидкостью, и способствует более быстрому ее растворению [4].

ЭФФЕКТИВНАЯ ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ГРАНУЛЫ В ЛОПАСТНОМ СМЕСИТЕЛЕ

Исследованная динамическая модель взаимодействия гранулы и лопасти (относительное перемещение гранулы по поверхности плоской лопасти при вращении вала) позволила определить следующие особенности:

1. Величина пути (l) гранулы изменяется прямо пропорционально угловой скорости (ω) вала и обратно пропорционально величине угла (φ). Данный вывод справедлив при изменении φ от 0° до 90° . При $\varphi = 90^\circ$ величина l остается постоянной и не зависит от изменения ω . Увеличение частоты вращения вала позволит увеличить траекторию гранулы на лопасти и обеспечить максимальный контакт с лопастью.

2. Траектории гранулы представляют собой почти прямые линии с отклонением в сторону противоположную направлению вращения вала. Гранула сходит с лопасти в различные моменты времени в зависимости от режима. При минимальной $\omega = 6,28$ рад/с гранула остается на лопасти в течение $t = 0,1$ мин только при углах φ от 60° до 90° . При увеличении угловой скорости до $\omega = 10,47$ рад/с нижняя граница диапазона угла φ расширяется до $\varphi = 40^\circ$ (рис. 4).

3. Изменение абсолютной скорости $V(t)$ прямо пропорционально изменению ω и обратно пропорционально изменению φ . При максимальной угловой скорости $\omega = 10,47$ рад/с вала $V(t)$ увеличивается на 23% и достигает значения $V(t) = 1,38$ м/с при $\varphi = 0^\circ$. С возрастанием угла φ от 10° до 90° скорость гранулы становится всё меньше и снижается процент её роста при увеличении ω . При $\varphi = 90^\circ$ гранула перемещается с наименьшей скоростью $V(t) = 0,78$ м/с, которая остается постоянной при любом ω в рассматриваемом диапазоне. Следовательно, при наибольшем контакте гранулы и лопасти скорость будет принимать значение $V(t) = 0,78$ м/с.

4. Наибольшая длительность контакта гранулы и лопасти наблюдается при $\varphi = 90^\circ$, но длина пути гранулы будет наименьшей среди возможных траекторий.

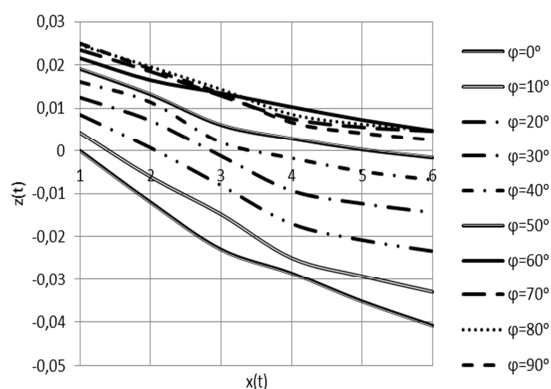


Рисунок 4 - Траектория движения гранулы за время $t = 0,1$ мин и $\omega = 10,47$ рад/с

Вывод

Процесс получения смеси протекает наилучшим образом при угловой скорости вращения вала $\omega = 10,47$ рад/с и углом наклона лопасти к плоскости вращения $\varphi = 90^\circ$. Такой режим работы и конструктивные параметры лопастного вала обеспечивают эффективную траекторию движения гранулы и способствуют максимально долгому ее нахождению на лопасти. В следствии этого, гранулы равномерно распределяясь по всему объему аппарата, при растворении, формируют смесь однородной концентрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками / И. А. Щупляк Польша, 1971. Л., Химия, 1975. 384 с.
3. Чернецкая Н.А. Параметры аппарата для приготовления жидких удобрений. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.20.01 - Технологии и средства механизации сельского хозяйства / Рубцовский индустриальный институт. - Рубцовск: РИО, 2001. - 24 с.
4. Чернецкая Н.А., Кантор С.А., Шапошников Ю.А. Исследование характеристик движения частицы в горизонтальном аппарате с радиальной лопастной мешалкой / Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, №1/1 2012. – С. 342 - 345

Шапошников Ю.А. - д.т.н., профессор, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, e-mail: kafedra.aiah@gmail.com, тел. (3852)290890

Чернецкая Н.А. - к.т.н., доцент, РИИ АлтГТУ им. И.И. Ползунова.