



Склабинский В. И.,
Скиданенко М. С.,
Демченко А. Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ НА ГИДРОДИНАМИКУ СТРУИ РАСПЛАВА ВИБРОГРАНУЛЯТОРОВ ПРОИЗВОДСТВА АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ

Представлен теоретический анализ параметров работы современных виброгрануляторов, которые широко используются для получения минеральных удобрений башенным методом. Установлена связь между гидродинамическими параметрами диспергируемых струй жидкости и воздействием диска — излучателя виброгранулятора. Теоретически обосновано и получено математическое выражение зависимости между режимом работы диска-излучателя и изменением давления в струе жидкости.

Ключевые слова: виброгранулятор, гранула, диск-излучатель, колебания, гидродинамика, струя жидкости.

1. Введение

Производство и использование гранулированных материалов является перспективным направлением развития химической, металлургической и сельскохозяйственной отраслей, что связано с такими качественными характеристиками гранул, как большая удельная поверхность, возможность длительного хранения, текучесть, дозирование и т. п. [1]. На сегодняшний день основные методы получения гранулированного продукта, используемые в промышленности, основаны на процессах прессования, окатывания, приллирования, «роста» гранул в кипящем слое. При выборе того или иного способа, главными критериями являются: показатели производительности, управления процессом, энергоэффективности, эффективности вложения инвестиций в производство и качества готового продукта [2].

2. Анализ литературных данных и проблематика

Для туковой промышленности, в частности, характерны высокие требования к объемам производства (порядка 200 млн. тонн в год), что делает актуальным использование грануляционных установок большой единичной мощности [3]. Полученный продукт должен иметь стабильный физико-химический состав, быть монодисперсным со сферической формой гранул, что позволяет проводить долговременное хранение насыпом без использования вспомогательного встряхивающего оборудования, соответствовать мировым стандартам качества. Максимально всем поставленным требованиям к производству и качеству продукта, соответствует способ приллирования, заключающийся в диспергировании расплава азотных, фосфорных, калийных удобрений в поток холодного теплоносителя с дальнейшей кристаллизацией расплава в каплях и получением гранул [4].

Одним из основных элементов технологического оборудования производства минеральных удобрений методом приллирования является вибрационный вра-

щающийся диспергатор (гранулятор) расплава, представленный конструкцией Сумского государственного университета (СумГУ) (рис. 1) [5].

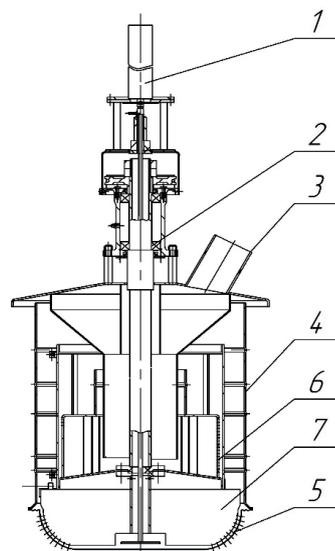


Рис. 1. Вибрационный вращающийся диспергатор:
1 — виброустройство; 2 — подшипниковый узел; 3 — патрубок ввода плава; 4 — цилиндрический корпус; 5 — перфорированное днище (корзина); 6 — распределитель; 7 — напорные лопасти

Под действием гидростатического напора расплав вытекает с отверстий перфорированной корзины, расположенной в нижней части аппарата, в виде струй, на которые накладываются вынужденные колебания и под действием которых они распадаются на монодисперсные капли. Значения частоты вынужденного сигнала зависят от многих факторов [6], одним из которых является скорость истечения расплава, а также изменение давления в струе. Так как расход жидкости, который в свою очередь определяется предыдущими стадиями технологического процесса, является сложно контролируемым показателем [7], то для получения

однородного продукта и гибкого контроля параметров работы вибрационной системы был разработан прибор (генератор) с адаптивным изменением частоты вынужденного сигнала в зависимости от уровня расплава в диспергаторе (грануляторе).

С ростом спроса на минеральные азотные удобрения, для создания конкуренции на рынке сбыта актуальна необходимость повышения качества получаемого продукта. Существующие предприятия стремятся увеличить производство азотных удобрений без строительства новых башен, что возможно достичь только путем модернизации узла грануляции. В связи с этим перед учеными и инженерами встает актуальная проблема модернизации существующего оборудования для диспергирования, заключающаяся в повышении монодисперсности готового продукта.

3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — процесс распространения колебаний во внутреннем пространстве корзины виброгранулятора с изучением их влияния на изменение давления в истекающих струях жидкости.

Цель исследования — получение математической зависимости, которая позволяет определить наиболее эффективные параметры работы устройства для получения монодисперсных капель и гранул.

Для развития метода и дальнейшего совершенствования конструкции этих аппаратов и методики расчета вибрирующих устройств требуется математический анализ влияния параметров вибрационного воздействия во внутренней полости аппарата на гидродинамику истекающих струй жидкости, необходимую для их распада на монодисперсные капли.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи:

1. Провести анализ работы современных виброгрануляторов расплава минеральных азотных удобрений.
2. Составить и решить уравнение Навье-Стокса с наложением граничных условий, учитывающих физическую картину процесса формирования и дробления струй с наложением колебаний диска-излучателя.
3. Провести математические преобразования для получения уравнения, которое выражает изменение давления в струе истекающей жидкости в зависимости от параметров работы устройства.

4. Результаты исследования влияния вибраций на гидродинамику струй расплава виброгранулятора

В Сумском государственном университете (СумГУ) разрабатывается методика расчета вибрирующих устройств, включающая комплекс работ по теоретическому и экспериментальному исследованию механизмов воздействия механических колебаний на расплав жидкости внутри корзины диспергатора. Изучается последующее распространение вибраций в вязком расплаве жидкости с учетом воздействия колебаний на перфорированную оболочку распылителя с дальнейшей передачей этих колебаний истекающим из отверстий оболочки струям. Физическую картину воздействия возмущений от диска-излучателя к истекающим струям сплава можно пояснить используя рис. 2. В качестве вибрирующего элемента

используется шток, на конце которого расположен круглый пластинчатый элемент — диск-излучатель.

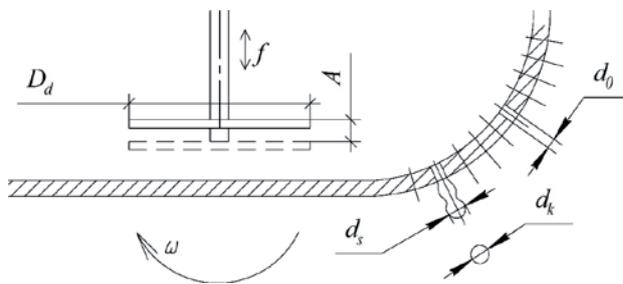


Рис. 2. Схема расположения диска-излучателя и корзины с отверстиями диспергатора: D_d — диаметр диска-излучателя; f — частота колебаний диска-излучателя; A — амплитуда колебаний; d_s — диаметр истекающей струи; d_k — диаметр образующихся капель; d_0 — диаметр отверстия; ω — скорость вращения перфорированного днища

Приводом такого излучателя является подсоединенный к штоку актуатор, который совершает возвратно-поступательные движения с частотой f от 200 до 1000 Hz. Шток актуатора перемещается с различной амплитудой (обычно эта величина составляет около 50 мкм). Такое движение соответствует перемещению определенного количества жидкости G за один период, которое можно определить по формуле:

$$G = \rho V = \frac{\pi D_d^2}{4} A \rho, \quad (1)$$

где ρ — плотность плава, кг/м³; V — расход под диском-излучателем, м³/с; D_d — диаметр диска-излучателя, м.

Для математического описания физической картины передачи пульсаций от диска-излучателя корзине принимаем некоторые допущения:

Расплав жидкости характеризуется высокой вязкостью. При этом, учитывая небольшие перемещения диска-излучателя, можно с достаточной степенью точности предполагать, что в слоях жидкости, которые находятся достаточно далеко от диска-излучателя, отсутствуют заметные течения, вызванные работой излучателя.

Вследствие непрерывности жидкости на эти слои будет воздействовать давление, которое создается движущимися слоями жидкости в непосредственной близости у диска-излучателя. Величину этого давления можно определить через расстояние, на которое перемещается диск-излучатель, и частоту движения этого диска:

$$p = \frac{\rho v_d^2}{2} = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\partial}{\partial \tau} (A \sin(2\pi f \tau)) \right)^2 = 2\rho (\pi A f \cos(2\pi f \tau))^2, \quad (2)$$

где v_d — скорость движения штока, м/с; A — амплитуда колебаний, м; τ — время, с.

Для определения давления жидкости непосредственно вблизи отверстий корзины ($z = 0$) необходимо учитывать затухание волн давления при их движении в расплаве, которое зависит от размеров диска-излучателя, свойств среды и расстояния от источника. Введя коэффициент Ψ , учитывающий рассеивание энергии волн давления во внутренней полости гранулятора, получим:

$$p_{z=0} = 2\rho(\pi Af \cos(2\pi f\tau))^2 \cdot \Psi, \quad (3)$$

где $\Psi = F(D_d, l, \phi)$, l – расстояние от диска-излучателя к корзине, ϕ – удельный коэффициент рассеивания энергии колебаний давления [8].

При наложении регулярных возмущений, струя жидкости распадается на капли одинакового размера без образования капель спутников, если длина λ образованных волн будет больше πd_0 . При таких условиях происходит рост во времени амплитуды поверхностных волн, возникающих на поверхности струи жидкости [9].

Таким образом, задаваясь частотой колебаний f и амплитудой A диска-излучателя, есть возможность влиять на зависимость изменения давления во внутренней полости аппарата $p = F(\tau)$. Необходимо установить, каким образом изменение давления под диском-излучателем влияет на процесс формирования струй жидкости, и какие возникают возможности для регулирования среднего диаметра и диапазона монодисперсности получаемых гранул готового продукта.

Основное упрощение, полученное на основе теоретических и экспериментальных научных работ и принято для решения поставленной задачи заключается в том, что возмущения на поверхности струи возникают в условиях, при которых можно считать течение осесимметричным, и тангенциальная составляющая скорости $v_\theta = 0$. Такие волны называются осесимметричными [10]. При осесимметричных волнах сечение струи остается круговым, происходит только ее сужение и расширение.

Для решения задачи, целью которой есть определение, каким образом осуществляется распространение колебаний и изменяется значение давления по длине струи, истекающей с отверстия перфорированного днища, используется система уравнений Навье-Стокса для нестационарного движения жидкости в цилиндрической системе координат [11]:

$$\frac{\partial v_r}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) \right) \right], \quad (4)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right], \quad (5)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) = 0. \quad (6)$$

Используя для решения системы (4)–(6) метод разделения переменных суммой [12, 13], было получено решение в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} p = C_{12} + \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + C_{11} + F(\tau), \\ v_r = \frac{C_2}{r} + C_3 r, \\ v_z = C_6 + C_7 \ln(r) + C_8 r^2 - 2C_3 z + C_5 + C_9 \tau + C_{10}, \end{cases} \quad (7)$$

где C_ν – постоянные интегрирования.

Вид функции $F(\tau)$ определяется исходя из граничных условий. Если начало координаты z совпадает

с центром отверстия, из которого происходит истечение расплава, то при $z=0$ первое уравнение системы (7) принимает следующий вид:

$$p_{z=0} = C_{12} + C_{11} + F(\tau). \quad (8)$$

Учитывая зависимость (3), которая показывает изменение давления под действием колебаний диска-излучателя, получаем выражение для определения функции $F(\tau)$:

$$F(\tau) = 2\rho(\pi Af \cos(2\pi f\tau))^2 \cdot \Psi - C_{12} - C_{11}. \quad (9)$$

При проведении экспериментальных исследований [6] снимались показатели колебания днища гранулятора и выводились на двухканальный осциллограф в виде графика синусоподобной функции, которая менялась в зависимости от параметров сигнала. Сравнительный анализ результатов эксперимента и теоретического расчета по уравнению (8) показал расхождение. Дальнейший анализ данных привел к выводу, что на струю действует дополнительно совокупность возмущений, источником которых является конструкция гранулятора и другие внешние воздействия (шум). Поскольку факторов конструкции аппарата и источников шумов, влияющих на распад струи, множество, их сложно учесть в теоретическом расчете. Для получения аналитической зависимости колебаний давления в струе от помех, которые генерирует конструкция диспергатора, к полученной синусоподобной зависимости (8) добавляются вынужденные колебания, которые генерируются внешним воздействием. Проанализировав результат, можно предположить, что дополнительно существует синусоидальная зависимость $a_1 \sin(\omega_1 \tau + c_1)$ собственных колебаний системы, где a_1 – амплитуда, ω_1 – циклическая частота, c_1 – фазовый сдвиг колебаний системы.

Добавив дополнительные функции, характеризующие процессы внутри аппарата была получена система уравнений:

$$\begin{cases} p = \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + 2\Psi\rho(\pi Af \cos(2\pi f\tau))^2 + \\ \quad + a_1 \sin(\omega_1 \tau + c_1), \\ v_r = \frac{C_2}{r} + C_3 r, \\ v_z = C_6 + C_7 \ln(r) + C_8 r^2 - 2C_3 z + C_5 + C_9 \tau + C_{10}. \end{cases} \quad (10)$$

Решение (10) является общим для осесимметрично-го потока жидкости. Учитывая физическую сущность процесса, накладываются следующие дополнительные граничные условия:

При $r=0$ радиальная скорость движения жидкости в струе равна нулю. Соответственно осевая скорость движения нераспавшейся части струи является максимальной, то есть имеет экстремум. Тогда в этой точке $\partial v_r / \partial r = 0$. Дифференцирование позволяет установить связь между константами C_7 и C_8 , что дает возможность упростить выражение для осевой скорости.

Объемный расход жидкости через отверстие круглого сечения определяется как:

$$Q_{\text{отв}} = 2\pi \int_0^{r_0} r v_z(r, z, \tau) dr, \quad (11)$$

где r_0 — радиус отверстия истечения струи.

Соответствующее интегрирование позволяет выразить константу C_9 через расход жидкости истекающей из отверстия днища, который может быть рассчитан исходя из общей нагрузки виброгранулятора.

Давление на поверхности струи ($r = r_s$) равно атмосферному $p = p_{\text{атм}}$.

Таким образом, проведя соответствующие математические преобразования получена зависимость между гидродинамическими параметрами струи, которые приводят к ее разрушению, и формой сигнала (гидродинамического воздействия) давления, которое обеспечивает формирование требуемой гидродинамической обстановки в струе:

$$2\rho(\pi A f \cos(2\pi f \tau))^2 \cdot \Psi + a_1 \sin(\omega_1 \tau + c_1) = p_{\text{атм}} - \rho \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\pi \tau_0^2} (-2Q_{\text{отв}} + 2\pi C_6 r_0^2 - 4\pi C_8 r_s^2 r_0^2 \ln r_0 + 2\pi C_8 r_s^2 r_0^2 + \pi C_8 r_0^4 - 4\pi C_3 z r_0^2 + 2\pi C_5 r_0^2 + 2\pi C_{10} r_0^2) + 4\nu C_8 \right). \quad (12)$$

5. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Была подтверждена актуальность и перспективность использования виброгрануляторов для многотоннажных производств минеральных удобрений.

2. Разработана теоретическая модель истечения жидкости из отверстий днища виброгранулятора, что позволило составить математические зависимости на основании общего уравнения Навье-Стокса, описывающие физические процессы в аппарате.

3. Установлена связь влияния параметров вибрации диска-излучателя и расхода жидкости через отверстие на изменение давления в истекающей струе расплава. Таким образом, это позволяет прогнозировать параметры распада струй с целью получения монодисперсных капель, что значительно повышает качество готового продукта.

Литература

1. Казакова, Е. А. Гранулирование и охлаждение азотсодержащих удобрений [Текст] / Е. А. Казакова. — М.: Химия, 1980. — 288 с.
2. Классен, П. В. Основные процессы технологии минеральных удобрений [Текст] / П. В. Классен, И. Г. Гришаев. — М.: Химия, 1990. — 304 с.
3. Чебланов, Н. В. Приллированный и гранулированный карбамид: свойства и перспективы [Текст] / Н. В. Чебланов, Ю. А. Сергеев, А. В. Солдатов // Международный деловой журнал «Евразийский химический рынок». — 2010. — № 9. — С. 26–33.
4. Холин, Б. Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости [Текст] / Б. Г. Холин. — М.: Машиностроение, 1977. — 182 с.
5. Скиданенко, М. С. Исследование процесса истечения струи жидкости из отверстия перфорированной оболочки приллера [Текст] / М. С. Скиданенко, В. И. Склабинский, Н. П. Кононенко // Вісник Національного Технічного Університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. — 2014. — № 26(1069). — С. 186–192.

6. Скиданенко, М. С. Гідромеханічні показники пристроїв для отримання монодисперсних крапель та гранул [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.17.08 / М. С. Скиданенко. — Суми, 2014. — 124 с.
7. Артюхов, А. Е. Анализ результатов промышленного внедрения вращающихся вибрационных грануляторов плава в агрегатах получения аммиачной селитры [Текст] / А. Е. Артюхов, Н. П. Кононенко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. — 2013. — № 1. — С. 35–41.
8. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика [Текст]. Т. VI. Гидродинамика: учебное пособие; в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — Москва: Наука, 1986. — 736 с.
9. Холин, Б. Г. О гидродинамическом парадоксе центрифуги [Текст] / Б. Г. Холин // Интенсификация технических процессов в химической и машиностроительной промышленности. — 1970. — № 3. — С. 7–13.
10. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика [Текст] / В. Г. Левич. — М.: Физматгиз, 1959. — 700 с.
11. Кочин, Н. Е. Теоретическая гидромеханика [Текст] / Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. — 4-е изд., Ч. II. — М.: Физматгиз, 1963. — 728 с.
12. Shingareva, I. Solving Nonlinear Partial Differential Equations with Maple and Mathematica [Text] / I. Shingareva, C. Lizarraga-Celaya. — New York: Springer Wien, 2011. — 359 p. doi:10.1007/978-3-7091-0517-7
13. Козлов, В. В. Круглая струя в поперечном сдвиговом потоке [Текст] / В. В. Козлов, Г. Р. Грек, М. А. Литвиненко, Ю. А. Литвиненко, Г. В. Козлов // Вестник НГУ. Серия: Физика. — 2010. — Т. 5, № 1. — С. 9–28.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙ НА ГІДРОДИНАМІКУ СТРУМЕНЯ РОЗПЛАВУ ВІБРОГРАНУЛЯТОРІВ ВИРОБНИЦТВА АЗОТНИХ ДОБРІВ

Представлено теоретичний аналіз параметрів роботи сучасних виброгрануляторів, які широко використовуються для отримання мінеральних добрив баштовим методом. Встановлено зв'язок між гідродинамічними параметрами диспергуємих струменів рідини і впливом диска — випромінювача виброгранулятора. Теоретично обґрунтовано та отримано математичний вираз залежності між режимом роботи диска-випромінювача і зміною тиску в струмені рідини.

Ключові слова: виброгранулятор, гранула, диск-випромінювач, коливання, гідродинаміка, струмінь рідини.

Склабинский Всеволод Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой процессов и оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств, Сумский государственный университет, Украина,

e-mail: sklabinский@pohnp.sumdu.edu.ua.

Скиданенко Максим Сергеевич, кандидат технических наук, кафедра процессов и оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств, Сумский государственный университет, Украина, e-mail: skidanenko@pohnp.sumdu.edu.ua.

Демченко Андрей Николаевич, аспирант, кафедра процессов и оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств, Сумский государственный университет, Украина, e-mail: a.demchenko@pohnp.sumdu.edu.ua.

Склабинський Всеволод Іванович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв, Сумський державний університет, Україна.

Скиданенко Максим Сергійович, кандидат технічних наук, кафедра процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв, Сумський державний університет, Україна.

Демченко Андрій Миколайович, аспірант, кафедра процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв, Сумський державний університет, Україна.

Sklabinskiy Vsevolod, Sumy State University, Ukraine,

e-mail: sklabinский@pohnp.sumdu.edu.ua.

Skidanenko Maksym, Sumy State University, Ukraine,

e-mail: skidanenko@pohnp.sumdu.edu.ua.

Demchenko Andrii, Sumy State University, Ukraine,

e-mail: a.demchenko@pohnp.sumdu.edu.ua