

μ – коэффициент, зависящий от условий закрепления $\mu=1$.

Вертикальная сила определяется следующим образом:

$$F_B = F_{II} + F_{KP}, \quad (21)$$

где F_{II} – подъемная сила.

Длина гибкого элемента в деформированном состоянии:

$$l_1 = \pi r_m + \Delta l, \quad (22)$$

или с учетом (19):

$$l_1 = \pi r_m + \frac{2\omega^2 \rho r_m}{\pi E} (x_0 \pi + 2r_m). \quad (23)$$

Перемещение y можно найти из рисунка 4:

$$y = 2r_m - 2B, \quad (24)$$

где B – малый радиус эллипса.

Поскольку конечная длина гибкого элемента l_1 известна, то для нахождения величины B можно воспользоваться формулой длины эллипса:

$$L_3 = \pi(A+B) \left[1 + \frac{\lambda^2}{4} + \frac{\lambda^4}{64} + \frac{\lambda^6}{256} + \frac{\lambda^8}{16384} + \dots \right], \quad (25)$$

где $\lambda = \frac{A-B}{A+B}$.

Вычислив численным методом величину перемещения y , составляем уравнение равенства работ центробежной и вертикальной сил исходя из закона сохранения энергии:

$$F_{II} \delta = F_B y. \quad (26)$$

Подставляя в (26) выражения (21) и (20) и решив его относительно F_{II} , получаем величину подъемной силы:

$$F_{II} = \frac{F_{II} \delta - F_{KP} y}{y}. \quad (27)$$



Заключение

При работе вибрационной машины шатун, соединяющий ее с виброприводом, должен располагаться горизонтально. Если данное условие не соблюдается, то линия действия силы со стороны шатуна на вибрационную машину также не будет горизонтальна. В этом случае возникают колебания машины не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскости, что отрицательно сказывается на качестве выполнения технологической операции, энергопотреблении и шуме. Определение же величины вертикального перемещения y нижней части вибропривода с шатуном аналитическим путем на стадии проектирования дает возможность правильно расположить вибропривод относительно вибрационной машины. Нахождение величины подъемной силы F_{II} , создаваемой при работе вибропривода, позволяет определить осевые нагрузки на опоры вала электродвигателя и на шарнирные соединения самого привода.

Библиографический список

1. Решение о выдаче патента по заявке на изобретение № 2007144745/28 (049030) от 12.03.2007 г. [Электронный ресурс] URL: http://www.fips.ru/cdfi/reestr_rupatap.htm.
2. Александров А.В. Сопротивление материалов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин. – М.: Высшая школа, 2007. – 560 с.
3. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. – М.: Изд-во МГТУ, 2005. – 592 с.

УДК 664.741.8

В.Л. Злочевский,
О.Н. Терехова,
М.Н. Белоусов,
И.А. Еремина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ПРОДУКТОВ РАЗМОЛА В КОЛЬЦЕВОМ ВРАЩАЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ

Ключевые слова: моделирование, продукты размола, пневмосепарирование, частица, воздух, усеченный конус,

разделение, параметры, эффективность, мукомольное производство.

На всех этапах измельчения зерна образующиеся продукты размола представляют собой полидисперсные смеси, состоящие из частиц, различных по размерам, форме и плотности. Диапазон размеров частиц готовой продукции – муки – определяется проходным сечением отверстия сита в соответствии с сортом. Так, например, для муки высшего сорта согласно ГОСТ Р 52189-2003 крупность помола должна соответствовать проходу через сито с размерами отверстий 140 мкм, с остатком на сите не более 5%, для муки первого сорта соответствующие показатели составляют 180 мкм и 2%. Таким образом, размеры частиц муки пшеничной высшего и первого сортов составляют от нескольких микрометров до 180-190 мкм, примерно половина количества имеет размеры менее 40-50 мкм, а остальные – до 190 мкм. Выравненность размеров частиц муки имеет большое значение для формирования качества хлеба, так как определяет одновременность протекания в тесте биохимических и коллоидных процессов. Кроме того, подтверждено, что частицы измельченного эндосперма, отличающиеся крупностью, имеют и различное содержание белка и крахмала, этим обусловлено их использование для различных видов хлебных и кондитерских изделий.

Выделение тонкой фракции из продуктов размола целесообразно проводить на всех этапах технологического процесса помола зерна и даже в процессе пневмотранспортирования и аспирации на этапе работы разгрузителей и пылеотделителей. Это позволит снизить в целом оборот продукта и нагрузку на просеивающую поверхность рассевов, а также фильтрующую поверхность тканевых фильтров, извлечь из воздушно-пылевого потока ценные пищевые продукты, а также снизить интенсивность изнашивания трущихся поверхностей оборудования и предотвратить возможность возникновения пылевых взрывов [1].

Жалюзийные инерционные отделители с набором конических элементов используются для предварительной очистки воздушного потока в газоочистке, отдельных технологических машинах зерноперерабатывающих производств, благодаря простоте конструкции, малому аэродинамическому сопротивлению и высокой пропускной способности. Для повышения эффективности очистки воздуха от пыли применяются также роторные пылеотде-

лители с набором вращающихся конических элементов [2].

На основе проведенного анализа существующих способов пневмосепарации тонкодисперсных материалов и очистки пылегазовых потоков нами предлагается модель аэроцентрибежного способа разделения продуктов размола во вращающейся кольцевой зоне разделения, образованной двумя коническими элементами [3].

Аэродисперсный поток, предварительно закрученный за счет тангенциального ввода (рис. 1), поступает в кольцевое вращающееся пространство, где окружные скорости воздуха и частиц твердой фазы приближаются к соответствующим скоростям точек конусов. Это пространство является рабочей областью. При моделировании рассматривается движение одной частицы, размеры которой изменяются в пределах 0-100 мкм.

Процесс сепарации частиц на поверхности конуса зависит от ряда аэродинамических, кинематических и конструктивных параметров, таких как: окружная скорость вращения конусов ω , угол конусности α , радиус основания внешнего усеченного конуса r_1 и соотношение между радиусом и высотой конуса, скорость воздуха и вдоль оси Z , скорость витания частицы $V_{\text{вит}}$.

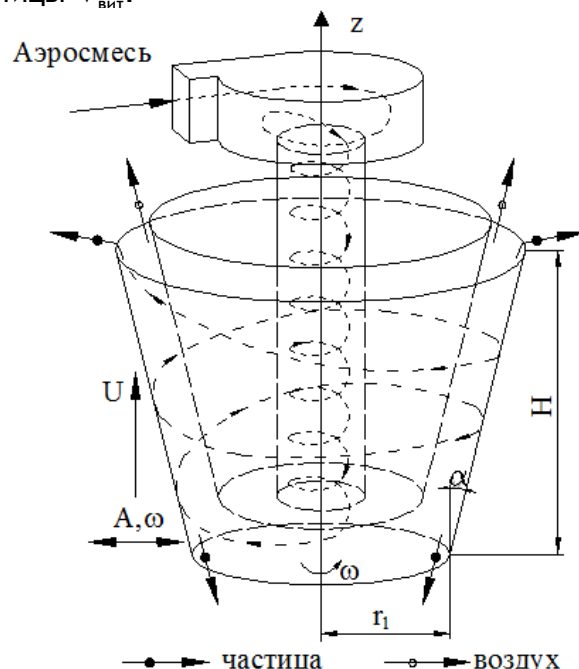


Рис. 1. Модель разделения аэродисперсного продукта в кольцевом вращающемся канале

Дифференциальные уравнения движения частицы решались в безразмерном виде, результаты расчетов представлены в виде зависимостей, показывающих ха-

рактен изменения траекторий и скоростей частиц с различными скоростями витания [4].

При движении частиц в кольцевом пространстве более «крупные» частицы с малыми скоростями витания достигают поверхности внешнего конуса на меньшей высоте, чем «мелкие», что подтверждается зависимостью радиальной координаты от времени (рис. 2).

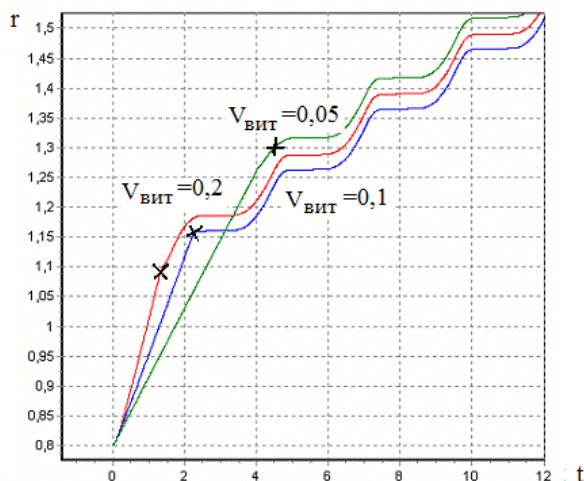


Рис. 2. Зависимость $r(t)$ для $r_1 = 0,1$ м; $u = 3$ м/с; $\omega = 100$ рад/с; $f = 0,6$, $\alpha = 15^\circ$

Различия в поведении частиц определяются до момента достижения частицей стенки внешнего конуса и в некотором промежутке времени после оседания на стенку. Затем, независимо от скорости витания, частицы ведут себя одинаково, участки, где частицы практически неподвижны, чередуются с участками перемещения по поверхности оседания, поэтому в дальнейшем, изучая виброперемещение, ограничимся рассмотрением частиц какого-нибудь одного размера.

Наблюдая за изменением вертикальной координаты частицы со скоростью витания $0,5$ м/с при различных скоростях транспортирующего ее воздуха, можно отметить ряд характерных особенностей: при скорости воздуха $0,5$ м/с траектория частицы направлена вниз и, не достигнув поверхности внешнего конуса, стремится вниз; при увеличении скорости воздуха до 2 и 3 м/с частица, достигнув поверхности внешнего конуса, оседает на ней, и, совершая виброперемещение, транспортируется вниз по образующей конуса; при скорости воздуха 4 м/с частица, достигнув поверхности конуса, перемещается по ней вверх, при дальнейшем увеличении скорости, не касаясь внешнего конуса, вылетает за пределы зоны сепарации (рис. 3).

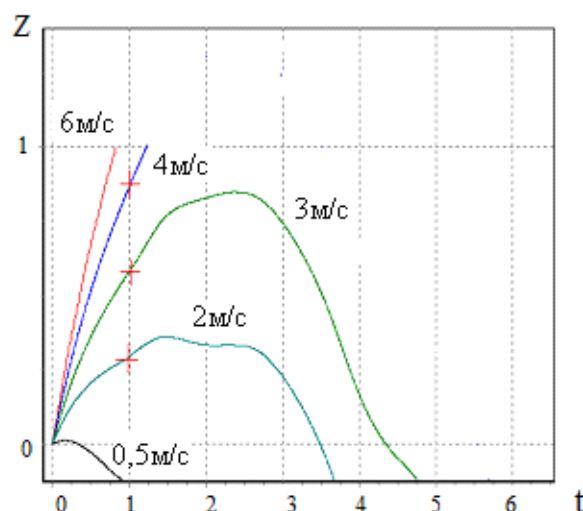


Рис. 3. Зависимость $z(t)$ $r_1 = 0,1$ м; $f = 0,6$; $\alpha = 15^\circ$; $\omega = 30$ рад/с, $V_{\text{вит}} = 0,5$ м/с

Таким образом, за одинаковое время данная частица проделывает различный путь для достижения стенки внешнего конуса, оседая на различной высоте в зависимости от скорости транспортирующего ее воздуха.

При увеличении окружной скорости конусов до $\omega = 50$ рад/с получаем несколько иную картину движения частиц (рис. 4).

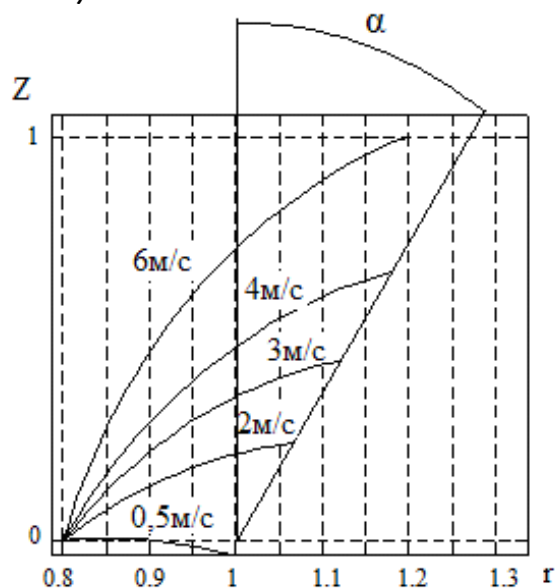


Рис. 4. Зависимость $z(t)$ $r_1 = 0,1$ м; $f = 0,6$; $\alpha = 15^\circ$; $\omega = 50$ рад/с; $V_{\text{вит}} = 0,5$ м/с

При скорости воздушного потока более $0,5$ м/с частицы достигают поверхности внешнего конуса на различной высоте, а для того чтобы частица вылетела, не касаясь внешнего конуса, необходима скорость воздуха более 6 м/с. Таким образом, для определения характера перемещения частицы и условий ее оседания

на рабочей поверхности необходимо задаваться определенным соотношением скорости воздушного потока и угловой скорости вращения конусов.

Рассмотрим более подробно влияние угловой скорости вращения конусов на движение частицы (рис. 5).

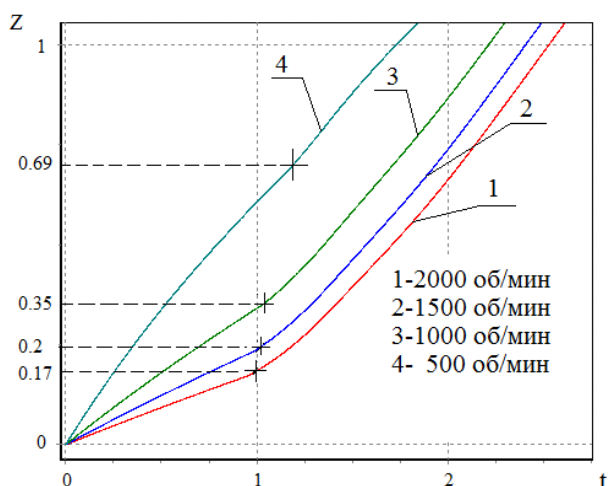


Рис. 5. Зависимость $z(t)$ $r_1 = 0,1$ м; $f = 0,6$; $\alpha = 15^\circ$; $u = 4$ м/с; $V_{\text{вит}} = 0,5$ м/с

Для разработки конструктивных параметров сепаратора данного типа очень важно определить размеры сепарационной зоны. Для осаждения частицы на поверхности конуса на меньшей высоте необходимо большее значение угловой скорости вращения конусов (рис. 5). Это связано с тем, что при $\omega = 75$ рад/с центробежная сила инерции частицы $F_u = m\omega^2 r$ примерно в 46 раз больше ее силы тяжести, в то время как для $\omega = 40$ рад/с – всего в 13. Траектории показывают, что для оседания частицы на поверхность в пределах рабочей области необходимо большое значение центробежной силы инерции частицы. Для этого нужно получить достаточно большую угловую скорость ω вращения конусов и воздуха. Кроме этого, если расстояние между конусами является относительно малым, то частицы уже в начале сепарации окажутся вблизи поверхности оседания. При этом удастся сепарировать более легкие частицы с малыми скоростями витания.

Между тем с ростом частоты вращения конусов увеличивается энергопотребление процесса. Моделирование ведется для частиц продуктов размола, скорость витания которых находится в пределах 0,05-1,2 м/с, следовательно, для которых не целесообразно создание высоких угловых скоростей, с другой стороны, чем

меньше угловая скорость, тем больше путь, пройденный частицей в межконусовом пространстве до момента ее осаждения на поверхности внешнего конуса, а следовательно, потребуется большая протяженность сепарационной зоны, что в свою очередь приведет к увеличению высоты сепаратора. Для процесса сепарации необходимо, чтобы частица достигла стенки и начала виброперемещение как можно раньше, так как это позволяет снизить протяженность кольцевого пространства, а, следовательно, и металлоемкость конструкции. Из графиков на рисунке 5 следует, что для продуктов размола зерна, имеющих скорости витания от 0,5 м/с, наиболее оптимальным значением частоты вращения конусов является $n = 300-1500$ об/мин. ($\omega \approx 40-150$ рад/с). Следует отметить, что данные значения скоростей витания соответствуют мельчайшим частицам, которые представляют собой муку с размерами частиц не более 100 мкм.

Угол раскрытия конусов α является одним из основных параметров процесса сепарирования в кольцевом пространстве (рис. 6-8).

Предполагается, что в начальный момент времени частица находилась на нижнем основании вблизи стенки внутреннего конуса. При α несколько меньшем, чем $-0,8$ для $\omega = 100$ рад/с и $\alpha < -0,65$ для $\omega = 75$ рад/с наблюдается пролет через верхнее основание, без осаждения на внешний конус (рис. 8). Это связано с тем, что центробежная сила инерции недостаточно велика, чтобы препятствовать движению частиц в направлении к оси конуса, причем по мере приближения к оси центробежная сила инерции уменьшается, а абсолютная величина радиальной скорости газа, а вместе с ней и частицы, растет. При уменьшении угла α , с одной стороны, увеличивается возможная высота конуса, с другой, – уменьшается модуль радиальной скорости газа и частицы, однако растет вертикальная скорость. Теперь, поскольку скорость движения по направлению к оси меньше, влияние центробежных сил инерции становится более весомым, вследствие чего частица осаждается.

Моделирование процесса движения частицы в кольцевом пространстве ведется в безразмерных параметрах и для определения габаритных характеристик сепаратора в модели задается отношение высоты конуса к радиусу внешнего усеченного конуса в его нижнем сечении

H/r_1 (рис. 1). Наиболее оптимальным является соотношение H/r_1 , равное 1 (рис. 6, 7, координата Z). Протяженность кольцевого пространства зависит от ряда факторов, но в большей степени от угла раскрытия конуса, чем больше угол α , тем меньше можно назначать высоту конуса.

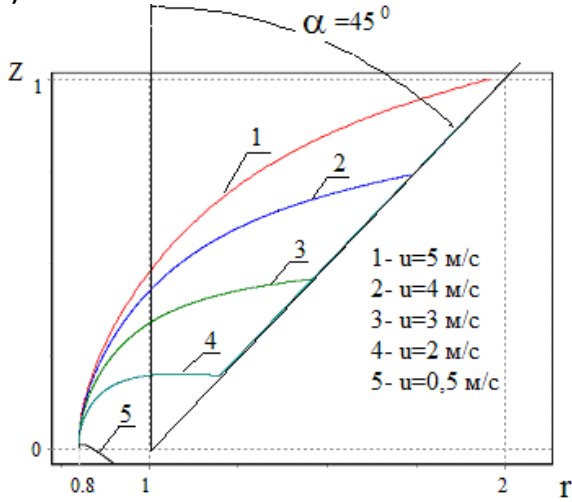


Рис. 6. Зависимость $z(\alpha)$ для $r_1 = 0,1$ м; $f = 0,6$; $\omega = 75$ рад/с; $V_{вит} = 0,5$ м/с

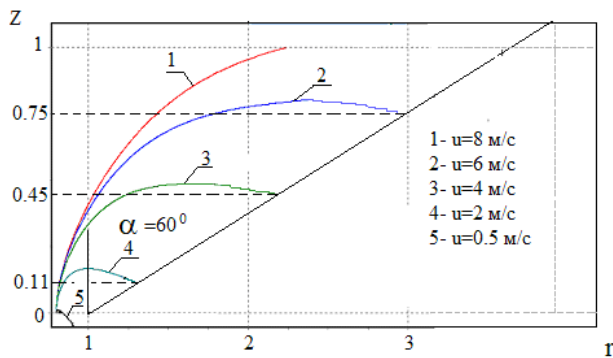


Рис. 7. Зависимость $z(\alpha)$ для $r_1 = 0,1$ м; $f = 0,6$; $\omega = 75$ рад/с; $V_{вит} = 0,5$ м/с

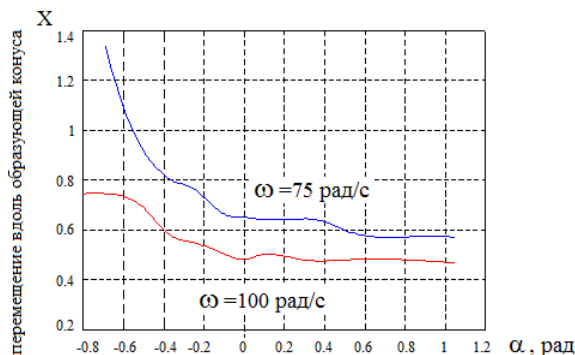
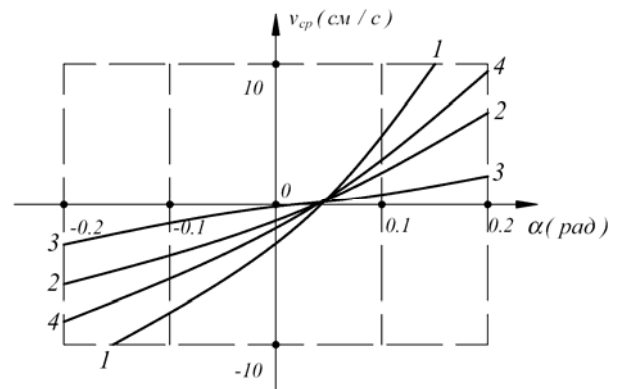


Рис. 8. Зависимость $X(\alpha)$ для $r_1 = 0,1$ м; $u = 3$ м/с; $V_{вит} = 0,5$ м/с

Для виброперемещения частиц по поверхности оседания основное значение имеют постоянные параметры α, p, f, H_d . Следует еще отметить значение относительной частоты вибраций

$p - \omega$, которая в случае взаимно противоположных вращений конусов и дисбаланса будет равна $p + \omega$. При $p = \omega$ и вращении в одну сторону частицы вообще не будут испытывать вибрационного воздействия со стороны поверхности оседания. И, наоборот, в случае противоположного вращения при $p = \omega$ получим относительную частоту вибраций, равную 2ω . Все результаты здесь приведены для случая противоположного вращения.

На рисунках 9-11 показаны зависимости средней скорости V_{cp} виброперемещения частиц вдоль образующей конуса от угла α конусности и от коэффициента f трения скольжения частиц при различных значениях других параметров. Положительное значение V_{cp} соответствует движению частиц вверх, а отрицательное – движению вниз. При этом положительное значение угла α конусности означает расширение конуса вверх, а отрицательное – вниз.



1. $H_0 = 2, \omega = 75, p = 750, f = 0,5$;
2. $H_0 = 1, \omega = 75, p = 750, f = 0,5$;
3. $H_0 = 1, \omega = 75, p = 750, f = 1,0$;

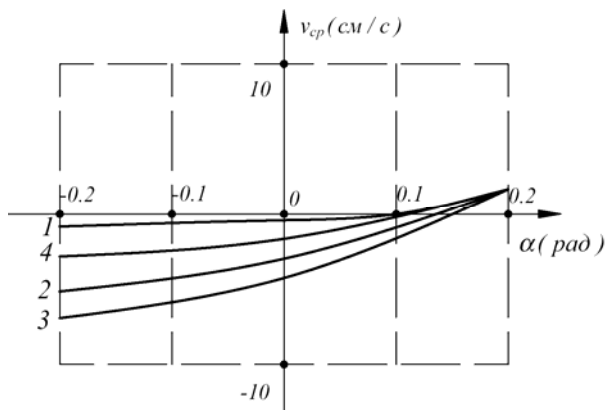
Случай 1 при полном торможении частицы при ударе о поверхность

Рис. 9. Зависимость средней скорости виброперемещения частицы от α

Таким образом, проведенные исследования и полученные графические зависимости подтверждают возможность сепарации и виброперемещения частиц вверх или вниз с необходимой скоростью. Анализируя результаты, можно сделать ряд выводов:

- данный способ пневмосепарирования применим для различных видов продуктов размола, скорость витания частиц которых колеблется в пределах 0,05-2,5 м/с,

особый интерес представляет отделение продукта с малыми скоростями витания ($V_{\text{вит}} \sim 0,05$ м/с), поскольку в отрасли существует проблема отбора муки, хотя в ней много ценного продукта;



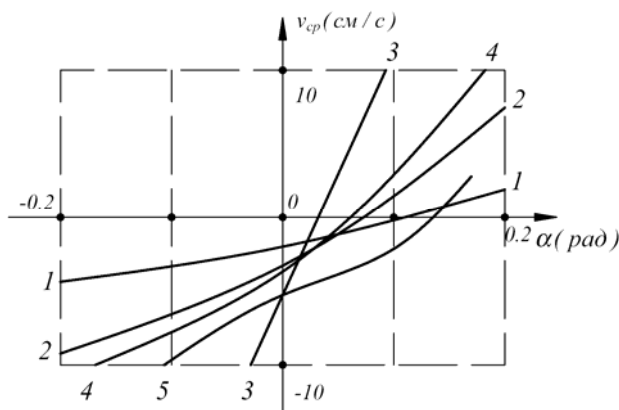
1. $H_d = 1, \omega = 75, p = 750, f = 2.$

2. $H_d = 2, \omega = 75, p = 750, f = 2.$

3. $H_d = 3, \omega = 75, p = 750, f = 3.$

Случай 2 при полном торможении частицы

Рис. 10. Зависимость средней скорости виброперемещения частицы от α



1. $H_d = 2, \omega = 75, p = 750, f = 1.$

2. $H_d = 2, \omega = 75, p = 375, f = 1.$

3. $H_d = 2, \omega = 75, p = 75, f = 1.$

4. $H_d = 1, \omega = 75, p = 75, f = 1.$

5. $H_d = 2, \omega = 30, p = 30, f = 1.$

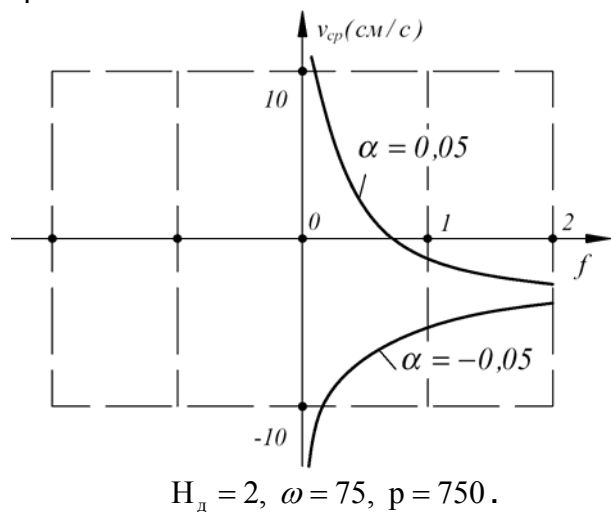
Рис. 11. Зависимость средней скорости виброперемещения частицы от α

- обоснование скорости воздушного потока приведет к снижению энергопотребления;

- в процессе виброперемещения необходимо, чтобы амплитуда колебаний частиц была минимальной, частица при этом должна «скользить» вдоль стенки конуса, тем самым уменьшая влияние воздушного потока на процесс разделения, что соот-

ветствует следующим параметрам: частота вращения конусов – до 1500 об/мин., угол раскрытия конусов – от 5 до 30°, скорость воздушного потока – от 2 до 4 м/с.

Применение устройств, работающих на основе пневмоцентробежного способа разделения аэродисперсного потока с вращающейся зоной разделения, в мукомольном производстве позволит повысить эффективность разделения продуктов размола, разгрузить рассевные системы, тем самым повысить качество готового продукта и снизить энергоемкость процесса. Многообразие режимов данных устройств позволяет использовать их на различных этапах технологического процесса.



$H_d = 2, \omega = 75, p = 750.$

Рис. 12. Зависимость средней скорости виброперемещения частицы от коэффициента трения

Библиографический список

1. Терехова О.Н. Пневмоцентробежное сепарирование дисперсных материалов / О.Н. Терехова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2008. – № 11. – С. 49-53.
2. Малис А.Я. Машины для очистки зерна воздушным потоком / А.Я. Малис, А.Р. Демидов. – М.: Машгиз, 1962. – 176 с.
3. Злочевский В.Л. Пневмоцентробежный классификатор-разгрузитель / В.Л. Злочевский, О.Н. Терехова, В.Г. Плотников // Техника в сельском хозяйстве. – 2007. – № 4. – С. 6-9.
4. Злочевский В.Л. Современные проблемы техники и технологии пищевых производств / В.Л. Злочевский, О.Н. Терехова, И.А. Еремина // Сборник докладов Восьмой научно-практической конференции с международным участием. – Барнаул: АлтГТУ, 2005. – С. 23-35.