

экономичными являются устройства относительно небольшой пропускной способности, основанные на применении контактного способа передачи теплоты зерну. При этом конструкция устройства должна, прежде всего, обеспечить равномерный нагрев и сушку продукта при надежном контроле его температуры и влажности.

Добиться снижения энергоемкости устройств можно при помощи совмещения процессов нагрева и транспортирования единичного слоя зерна на основе использования соответствующих рабочих органов. При этом обеспечиваются непрерывность процесса сушки и равномерность нагрева обрабатываемого зерна.

Разработанное устройство для сушки зерна позволяет на высоком технологическом уровне сушить зерно различных культур без снижения качества готового продукта. Производственные исследования разработанного универсального устройства показали высокую эффективность при применении его в процессах сушки зерна различных культур. Расхождения значений основных показателей процесса сушки зерна, полученных в производственных и лабораторных условиях, не превысили 4,7%, что свидетельствует о хорошей сходимости результатов.

Предложенное устройство может быть рекомендовано к использованию небольшими сельскохозяйственными и перерабатывающими предприятиями, фермерскими хозяйствами для сушки зерна различных культур.

Библиографический список

1. Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 годы. – М.: МСХ РФ, 2012. – 204 с.
2. Данилов О.Л., Леончик Б.И. Экономия энергии при тепловой сушке. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 133 с.
3. Красников В.В. Кондуктивная сушка. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.
4. Патент RU № 2436630. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; опубл. 20.12.2011; Бюл. № 35.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. школа, 1967. – 599 с.
6. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Металлургия, 1969. – 157 с.
7. Курдюмов В.И. Разработка и исследование машин для механизации животноводства и их рабочих органов. – Ульяновск, 2002. – 159 с.
8. Малин Н.И. Энергосберегающая сушка зерна. – М.: Колос, 2004. – 240 с.
9. ГОСТ 10968-88. Зерно. Методы определения энергии прорастания и способности прорастания. – М.: Изд-во Минхлебопродуктов СССР, 1988. – 3 с.

Работа выполняется в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-2516.2012.8.



УДК 631.363

А.А. Наймушин

МОДЕЛЬ РАЗМОЛА ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ЕГО МОЛЕКУЛЯРНОЕ СТРОЕНИЕ

Ключевые слова: модель размола зерна, молекулярное строение, измельчение, энергия связи, крахмальные гранулы.

Введение

Изучению прочности и механического разрушения зернового материала посвящено множество оригинальных работ, в которых основной акцент сделан на теорию прочности зерна и механизм его разрушения (кинетика разрыва молекулярных связей

при упругопластичных деформациях, образование и рост трещин, релаксация напряжений и т.д.) [1].

В настоящее время научились связывать технологические свойства зерна с его биологическим строением: все операции над зерном сводятся к его разделению на составные части. Именно поэтому большой интерес представляет изучение анатомического строения зерна с применением современных электронных микроскопов сканирующего типа.

Для разрушения тела зерновки на части необходимо приложить разрушающее усилие величиной, превышающей силу межмолекулярного сцепления и притяжения между частицами. Работа в данном случае расходуется на преодоление внутренних сил, которые, в свою очередь, зависят от физико-механических свойств разрушаемых материалов и характера приложения разрушающих усилий.

Выбор оптимального способа измельчения исходного сырья не только влияет на выравненность гранулометрического состава муки, но и на качество готовой продукции, а также на наличие в ней большого количества мелких фракций, характеризующих её высоким уровнем повреждённого крахмала, что также оказывает негативное влияние на физические свойства теста. Именно поэтому предметом наших исследований является разработка теоретической модели процесса измельчения зерна, устанавливающая связь между приложенной энергией, затрачиваемой на разрыв межмолекулярных связей в зерновке, и средним размером частиц, продукта размола [3].

Объекты и методы

Для более глубокого понимания физико-химических процессов размола зернового материала необходимо изучить биологическое строение продуктов размола.

Мука пшеничная представляет собой совокупность крахмальных зёрен, преимущественно правильной сферической формы, а также комочков отдельных некрахмальных частиц (белковой, целлюлозной и гемицеллюлозной природы). В пшеничной муке некрахмальные частицы образуют крупные кангломераты и возможно при более тонком измельчении имеют внутри себя крахмальные гранулы [5].

Рассмотрим процесс измельчения определённой фракции продуктов размола с точки зрения макроскопической механики. Частицы размола имеют средний линейный размер D_{cp} . Как видно из результатов исследования продуктов размола зерновки на электронном микроскопе, они представляют собой преимущественно совокупность крахмальных зёрен (в среднем количестве 75%) правильной сферической формы (рис. 1).

Объём частицы равен $V_{ч} = f_v D_{cp}^3$, и площадь её поверхности $S_{ч} = f_s D_{cp}^2$, где f_v и f_s – формофакторы объёма и площади поверхности. Для сферических частиц формофакторы равны: $f_v = \pi/6$ и $f_s = \pi$,

откуда отношение $f_s/f_v = 6$. Если рассмотреть частицы размола в первом приближении, то можно убедиться, что они одинаковы по форме. Это объясняется биологической особенностью макроскопического строения зерновки (рис. 2).

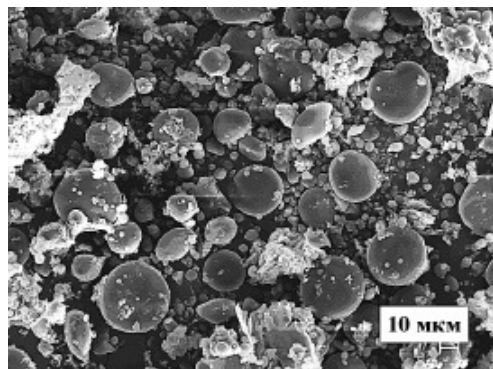


Рис. 1. Мука пшеничная под микроскопом

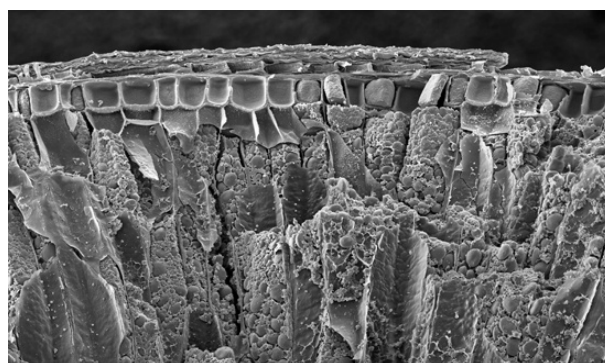


Рис. 2. Поперечный срез зерновки. Увеличение 100 Мкм

Саму же зерновку целесообразнее рассматривать как комплексную конструкцию, прочность которой определяют множество факторов: свойства элементов тканей и их связи между собой.

Высказанные соображения позволяют присоединиться к концепции Раздорского и рассматривать зерно как монолитную конструкцию, «комплексное сооружение», в котором стенки клеток являются каркасом, а крахмальная масса вместе с белковой тканью – наполнителем. Всё зерно действует, таким образом, как монолитная конструкция, обладающая определенной связанностью отдельных частей, комплексное действие которых и создаёт сравнительно высокую сопротивляемость при размоле зерновой массы.

Сравнительный анализ размеров показал, что соотношение крупных и мелких крахмальных зёрен у всех образцов варьируется в пределах: крупные – от 13,4 до 14, 6%; мелкие – от 85,5 до 87% (рис. 3). При этом гранулы крахмала имеют сферическую форму, это хорошо просматривается при их исследовании на электронном микроскопе.

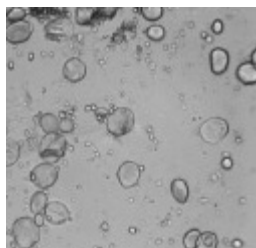


Рис. 3. Зерна крахмала зерновки пшеницы под микроскопом

Если в первом приближении зерновка (или продукт размола) и выход частиц соответствующей фракции одинаковы по форме (или распределение частиц по форме в исходном и размолотом продукте одинаково), то f_s/f_v есть постоянная величина.

Пусть исходная зерновая смесь имеет плотность ρ и её масса равна M , тогда число частиц продукта размола будет равно $M/\rho V_{cp.} = M/(\rho f_v D_{cp.}^3)$. Согласно статической теории разрушения энергия расходуется на совершение работы на разрыв межмолекулярных связей в зерновке и на создание дополнительной поверхности, возникающей при делении зерновки на части.

С учётом этого энергию, расходуемую на размол зернового материала, можно представить как

$$E_{изм.} = \frac{M}{\rho f_v D_{cp.}^3} (E_{разр.} + E_{обр.нов.}), \quad (1)$$

где $E_{разр.}$ — энергия, расходуемая на разрыв межмолекулярных связей в зерне;

$E_{обр.нов.}$ — энергия, расходуемая на создание дополнительной поверхности при измельчении.

При размоле одной порции исходного зернового материала образуется $n = D_{cp.}^3/D^3$ меньших частиц со средним

размером D , как видно из исследований образцов продуктов размола зерна на электронном микроскопе, объёмом $f_v D_{cp.}^3$ и площадью $f_s D^2$. Площадь поверхности всех частиц, возникших при размоле, равна $S = n f_v D^2 = f_s D_{cp.}^2 (D_{cp.} - D)/D$.

При размоле одной частицы исходного зернового материала образуется $n = D_{cp.}^3/D^3$ меньших частиц со средним линейным размером D , объёмом и площадью поверхности одной частицы $f_v D^3$ и $f_s D^2$.

Тогда площадь поверхности всех частиц, возникших при размоле, равна:

$$S = n f_s D^2 = f_s D_{cp.}^3/D, \quad (2)$$

увеличение площади поверхности:

$$\Delta S = S - S_{cp.} = f_s D_{cp.}^2 (D_{cp.} - D)/D. \quad (3)$$

Раскалывание зерновки преимущественно происходит по плоскостям соприкосновения крахмальных зёрен эндосперма, при этом большое значение имеет направление приложения нагрузок, т.к. крахмальные зёрна, с учётом их биологического строения, располагаются в полостях скелета зерновки, в котором они закреплены. При этом если произвести сжатие зерновки по толщине на некоторую величину ΔX , то при помощи электронной микроскопии можно увидеть, что происходит смещение зёрен эндосперма относительно скелета, который пронизывает всё её тело.

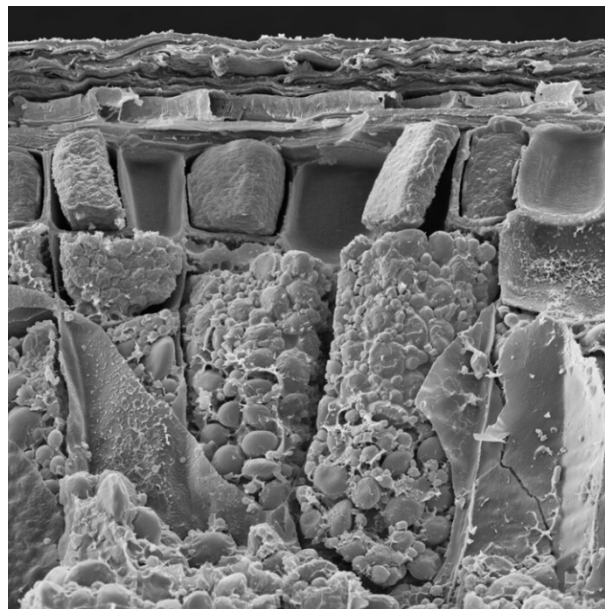


Рис. 4. Поперечный срез зерновки пшеницы. Увеличение 100 Мкм

Скелет представляет собой ткань (целлюлозной или гемицеллюлозной природы), которая прочно соединена с оболочкой клеток алейронового слоя, пронизывающая зерновку по всей толщине, имеющая прямоугольную полую форму, к внутренней стороне которой прочно прикреплены зёрна эндосперма (рис. 4). Такое внутренне упорядоченное строение зерновки обеспечивает ей не только прочность, но и лёгкое проникновение питательных веществ во время роста и созревания мелкого плода через микрокапиллярную систему. Эластичность ткани скелета обеспечивает не только беспрепятственный рост крахмальных зёрен, но и правильную ориентацию их во время развития и созревания плода в процессе его формирования.

Данные факты дают возможность понять, каким образом необходимо воздействовать на зерновой материал рабочими органами измельчителя с целью снижения удельной работы измельчения. При этом можно сделать выводы, почему измельчение зерновки лучше производить по её толщине: т.к. её скелет в данном случае будет иметь вертикальную ориентацию, по отношению к рабочим органам измельчителя, тем самым деформируясь от нагрузок, будет способствовать высвобождению крахмальных зёрен. Также стоит упомянуть, что при такой ориентации зерновки бороздка способствует раскрытию «развёртыванию» оболочек плода, тем самым высвобождая эндосперм и не мешая прямому воздействию на него рабочими органами машины.

Для более глубокого понимания этого процесса допустим, что площадь плоскости относительного перемещения зёрен эндосперма (относительного смещения), в рассматриваемой зерновке пшеницы, равна S_f , тогда число плоскостей, по которым будет происходить (разрывание микрокапиллярной системы связи) диспергирование тела плода, под приложенными внешними нагрузками, равно $\Delta S/S_f$.

Если через каждую площадь относительного перемещения крахмальных зёрен, относительно удерживающего скелета, с которым они взаимосвязаны, проходит q межмолекулярных связей с энергией u , то энергия, затраченная на разрыв межмолекулярных связей, равна:

$$E_{\text{разр.}} = qu\Delta S/S_f = qu f_s D_{\text{ср.}}^2 (D_{\text{ср.}} - D)/S_f D \quad (4)$$

Приращение поверхностной энергии в данном случае связано с увеличением площади поверхности частиц на величину ΔS , равно [4]:

$$\Delta E_s = \gamma \Delta S, \quad (5)$$

где γ – удельная (приходящаяся на единицу площади границы раздела) избыточная энергия, обусловленная биологическим строением зерновки.

Так как энергия, затраченная на создание дополнительной поверхности, возникающей при раскалывании крахмалистого эндосперма, во много раз больше, чем приращение ΔE поверхностной энергии, т.е.

$$E_{\text{обр.нов.}} = \beta \Delta E_s = \beta \gamma \Delta S, \quad (6)$$

где β – коэффициент пропорциональности.

Отсюда следует:

$$E_{\text{обр.нов.}} = \beta \gamma f_s D_{\text{ср.}}^2 (D_{\text{ср.}} - D)/D. \quad (7)$$

При размоле зерновки происходит сильнейшая механическая деформация, в результате которой высвобождаются зёрна крахмалистого эндосперма, при этом границы их раздела являются неравновесными из-за биологического строения плода.

Для более точного понимания процесса измельчения зерновки необходимо учитывать в ней хаотическое образование микро-разрывов гранул (микротрещин эндосперма) под приложенными разрушающими нагрузками, появляющимися преимущественно на границах раздела зёрен эндосперма.

При этом если будет превышен предел упругости зерновки, то наблюдается процесс течения материала. Это обусловлено относительным перемещением частиц эндосперма и начальным разрушением целлюлозного скелета зерновки, а также преодолением внутренних межмолекулярных связей плода. Микродефекты, возникающие в этом переломном моменте, зачастую имеют уже необратимый характер, так как внутренняя упорядоченная структура тела плода уже будет нарушена, а возникающие микроизломы скелета зерновки и процесс смещения гранул крахмала в эндосперме будут создавать зоны повышенных напряжений, которые в свою очередь стимулируют процесс размола зерна при повторном воздействии на него рабочими органами измельчителя.

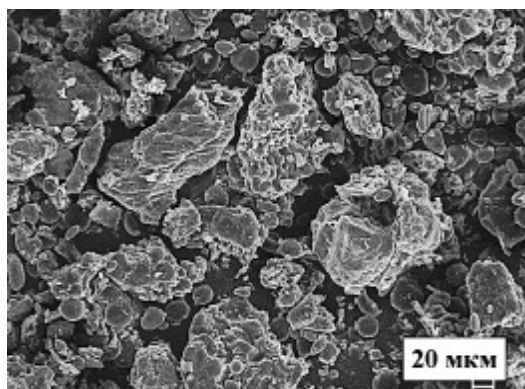


Рис. 5. Мука пшеницы 1-го сорта под микроскопом

В таком сложном процессе, чтобы определить величину среднеквадратичной деформации гранул эндосперма и оценить избыточную энергию границ раздела, непосредственно связанную с появлением внутренних напряжений, предложено рассмотреть модель *неравновесных границ диспергирования зернового материала*.

Для более глубокого понимания критических параметров разрушения материала необходимо ввести коэффициент смещения зёрен эндосперма K относительно границ их раздела. Предложенный коэффициент играет ключевую роль в процессе измель-

чения зерновки, т.к. основная энергия (напрямую зависящая от приложения усилий для разрушения материала) затрачивается на разрыв межмолекулярных связей в зерне. Тем самым, превышая этот порог, в эндосперме зерна начинают распространяться микротрещины, наблюдаются разрывы оболочек, возникают очаги критических напряжений. Наиболее выраженная их концентрация наблюдается в области бороздки. При дальнейшем нагружении коэффициент смещения крахмальных зёрен увеличивается, тем самым нарушается микрокапиллярная система, связывающая их с целлюлозным скелетом и между собой. Благодаря этому можно говорить о высвобождении крахмальных гранул и последующем их разделению.

Судя по размерам фракции измельчённого целлюлозного скелета зерновки, можно сделать вывод, что он довольно прочный (рис. 5). И при критических нагрузках характер его разрушения сопоставим с разрушением стекловидного материала. Это отчётливо просматривается в микроскопическом исследовании продуктов измельчения.

После оценки данных характеристик зерновки, исходя из биологического строения плода, было предложено определить избыточную энергию границ раздела частиц эндосперма.

Выражение для определения избыточной энергии границ раздела γ будет иметь вид:

$$\gamma = \frac{G K^2 \rho \ln\left(\frac{D_{cp.}}{2K}\right)}{4\pi(1-\nu)}, \quad (8)$$

где G – модуль сдвига;

ν – коэффициент Пуассона;

K – коэффициент смещения.

Подставляя $E_{обр.нов.}$ и $E_{разр.}$ в уравнение (1), получим формулу, связывающую энергию измельчения со средним размером частиц $D_{cp.}$, получаемых в результате размола зерновой смеси:

$$E_{изм.} = \frac{M}{\rho f \nu D_{cp.}^3} \cdot \left[\frac{qu f_s D_{cp.}^2 (D_{cp.} - D)}{S f D} + \beta \cdot \left(\frac{G K^2 \rho \ln\left(\frac{D_{cp.}}{2K}\right)}{4\pi(1-\nu)} \right) \cdot \frac{f_s D_{cp.}^2 (D_{cp.} - D)}{D} \right] \quad (9)$$

Результаты и их обсуждение

Предложена новая модель размола зернового материала, устанавливающая связь между приложенной энергией, затрачиваемой на разрыв межмолекулярных связей в зерновке и средним размером D , продукта размола. Показано, что энергия при размоле расходуется на разрыв молекулярных связей между крахмальными зёрнами эндосперма зерновки и на создание дополнительной поверхности при измельчении зерна.

Это характеризуется тем, что микротрещины, возникающие в зерновке при её измельчении, в основном появляются и проходят через границы раздела крахмальных зёрен и пронизывают её тело наиболее интенсивно в зоне прохождения бороздки, при дальнейшем нагружении – весь объём зерна, тем самым высвобождая крахмальные гранулы эндосперма.

При этом характер приложения разрушающих усилий, безусловно, будет влиять на процесс разделения зерновки на части и на количество повреждённых крахмальных зёрен, как и их размер влияет на качество муки.

Чем больше мелких крахмальных зёрен, тем больше водопоглотительная способность и тем более эластичным становится тесто. Если крахмальные зёрна крупные, то мука берёт меньше воды, тогда мякиш готовой продукции быстро теряет влагу и в связи с этим быстрее крошится и черствеет.

Большое количество повреждённых зёрен крахмала создает условия для активной деятельности амилазы, образующей декстрины, что приводит к образованию в тесте несвязанной воды, за счёт чего оно разжижается и впоследствии происходит увеличение липкости мякиша хлеба [2].

Именно поэтому необходимо производить измельчение зерновки плавно, регулируя характер и силу приложенной энергии, затрачиваемой на разрыв молекулярных связей, чтобы каждая её часть находилась в равновесном состоянии [6].

Заключение

Предложенная теоретическая модель размола зернового материала, которая позволяет перейти от эмпирического подбора условий измельчения к теоретическому определению параметров размола исходя из особенностей молекулярного строения плода зерновки.

Библиографический список

1. Егоров Г.А. Технологические свойства зерна. – М.: Агропромиздат 1985. – С. 8.
 2. Косован А.П. Современная наука в технологии и технике хлебопекарной промышленности // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2007. – № 1 – С. 7-11.
 3. Куприц Я.Н. Физико-химические основы размола зерна. – М.: Заготиздат, 1946. – С. 41.

4. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твёрдых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
 5. Хусид С.Д. Измельчение зерна (теоретические основы и практика). – М., 1958. – С. 248.
 Чистов С.А. Механические свойства зерна пшеницы // Известия Томского института технологии зерна и муки. – 1936. – Т. 2. – Вып. № 5.



УДК 621.9Т

**А.А. Багаев,
Р.С. Чернусь**

ТРЕБОВАНИЯ К ВРЕМЕННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ И ОБОСНОВАНИЕ ОБЛАСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОЛЮСОВ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСХОДОМЕРА СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ключевые слова: временные характеристики, центробежный расходомер, передаточная функция, перерегулирование, полюса передаточной функции, двигатель, электропривод.

Введение

Основы теории, устройство, законы функционирования и принцип действия центробежного расходомера представлены в работах [1-4].

Получена передаточная функция центробежного расходомера сыпучих сельскохозяйственных материалов по току приводного двигателя [5]:

$$W(p)_{Q \rightarrow i} = \frac{T_3 p + 1}{(p^2 T_3 T_m + p T_m + 1) \beta_1} = \frac{T_3 p + 1}{(T_1 p^2 + 2 \xi T_1 p + 1) \beta_1} \quad (1)$$

где ξ – безразмерный коэффициент затухания.

Связь между параметрами электропривода и колебательного звена имеет следующий вид:

$$T_1 = \sqrt{T_m T_3}; \xi = \frac{T_m}{2 T_1} = \frac{\sqrt{m}}{2}; m = \frac{T_m}{T_3} \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) использованы следующие обозначения:

$$\beta_1 = \frac{x_2 + x_5}{x_1}; T_m = \frac{x_2 + x_4 T_R}{x_5 + x_4};$$

$$T_3 = \frac{x_2 T_R}{x_2 + x_4 T_R}; T_R = \frac{1}{\omega_{0ном} s};$$

$$x_1 = \left(\frac{\partial M_C}{\partial Q} \right)_0 \frac{Q_0}{A} i;$$

$$A = - \frac{\omega_0 R_2 U_1^2}{s^{3/2} \sqrt{U_1^2 - x_k^2 I_{10}^2}};$$

$$x_2 = J_S i; x_4 = \frac{\partial M_C}{\partial \omega_2}; x_5 = \beta i,$$

где T_R – электромагнитная постоянная времени двигателя;

β – жесткость механической характеристики двигателя;

$\omega_{0ном}$ – номинальная угловая частота вращения двигателя в режиме холостого хода; s – скольжение;

M_C – момент сопротивления;

Q – расход сыпучего продукта;

i – передаточное число редуктора;

R_2 – активное сопротивление ротора;

U_1 – фазное напряжение;

x_k – индуктивное сопротивление короткого замыкания статора;

I_{10} – ток статора;

J_S – момент инерции вращающихся масс, приведенный к валу двигателя;

ω_2 – угловая скорость вращения крыльчатки.

Известно, что значение безразмерного коэффициента затухания ξ , выраженное через параметры двигателя, нагрузки и механической передачи, определяет степень колебательности электропривода центробежного расходомера [6]. Коэффициент затухания может принимать либо отрицательные действительные, либо комплексносопряженные значения, что определяет общий вид временных характеристик переходного процесса устройства.