

666
M91

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 666.961

Мурог Виталий Юрьевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ
И МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ В АППАРАТАХ
ДЕЗИНТЕГРАТОРНОГО ТИПА**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 2005

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет».

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Вайтехович П. Е.,
УО «Белорусский государственный технологический университет»,
кафедра машин и аппаратов химических и силикатных производств

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Сиваченко Л. А.,
УО «Белорусско-Российский университет», кафедра строительного
дорожных и подъемно-транспортных машин и оборудования;

кандидат технических наук, доцент
Протасов С. К.,
УО «Белорусский государственный технологический университет», кафедра
процессов и аппаратов химических производств

Оппонирующая организация Государственное предприятие
«НИИСМ» (г. Минск)

Защита состоится 26 мая 2005 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Совета по защите диссертаций Д 02.08.02 при УО «Белорусский государственный технологический университет» (Беларусь, 220050, г. Минск, ул. Свердлова, 13а) в аудитории 240 корп. 4. Тел. 226-00-39; факс (017) 227-62-17, электронная почта: root@bstu/unibel.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УО «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан ____ апреля 2005 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
доктор технических наук, профессор



В. А. Марков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Диспергирование – это не просто изменение размеров частиц, а сложный физико-химический процесс повышения химической активности вещества вследствие увеличения его поверхностной энергии и энергии внутреннего строения, при котором реализуется целый комплекс различных физических и химических явлений. Изменение энергетического состояния вещества при его измельчении называется механической активацией. Причем, если в последующих процессах накопленную твердым телом энергию удастся реализовать, то КПД следует относить не к процессу диспергирования, а к процессу активации в целом. Его величина в среднем на порядок выше, чем КПД процесса образования новой поверхности.

Процессы диспергирования и механоактивации в последнее время находят все большее применение. Однако их широкое внедрение в промышленных условиях сдерживается главным образом отсутствием высокоэффективной и надежной в работе техники, а также недостаточной изученностью этих в высшей степени сложных процессов.

Актуальность заключается в том, что работа посвящена повышению эффективности и определению оптимальных параметров процессов диспергирования и механической активации, являющихся одними из наиболее энергоемких во многих отраслях промышленности.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Исследования, выполненные по теме диссертации, проводились в рамках государственных тем: ГБ 20–029 «Исследование диспергирования и механической активации в сухом состоянии и в водной среде» (№ госрегистрации 2000940, 2000–2001 г.г.), ГБ 23–038 «Исследование диспергирования и механической активации вяжущих материалов в аппаратах дезинтеграторного типа» (№ госрегистрации 2003/024, 2003 г.).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является повышение эффективности обработки твердых материалов в измельчителях-активаторах дезинтеграторного типа при минимизации энергетических и капитальных затрат.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выбрать основные направления использования дезинтеграторной техники для диспергирования и механоактивации твердых материалов и обосновать этот выбор.
2. Разработать систему взаимосвязанных дифференциальных уравнений, описывающую процессы, протекающие при обработке материала в измельчителе-активаторе дезинтеграторного типа, и на ее основе получить инженерную методику расчета оптимальных параметров этих аппаратов.
3. Разработать более совершенные по технико-экономическим показателям конструкции, провести их экспериментальные исследования применительно к различным материалам и определить оптимальные области применения.

690 ар

Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Смоліча

4. Довести результаты научной работы до промышленного внедрения.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются процессы, протекающие при обработке твердых материалов в высокоскоростных аппаратах дезинтеграторного типа.

Методология и методы проведенного исследования. В работе использовались инструменты и оборудование, соответствующие государственным стандартам, а также созданные на их базе экспериментальные установки. Использовался комплекс известных методов и стандартных методик, соответствующих приборов для измерения и контроля исследуемых параметров, техническое и программное обеспечение ПК.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Составлена система взаимосвязанных дифференциальных уравнений, описывающих движение и разрушение твердых материалов в аппаратах дезинтеграторного типа, в которой впервые комплексно учтено влияние следующих факторов:

- сил взаимодействия частиц друг с другом и рабочими органами;
- изменение концентрации и размеров частиц при последовательном перемещении по рабочим зонам;
- вероятность центрального удара при взаимодействии с измельчающим элементом;
- влияние воздушного потока;
- условия загрузки и выгрузки материала.

На основе решения этой системы разработан алгоритм расчета аппаратов дезинтеграторного типа, давший возможность создать более совершенные, а так же принципиально новые конструкции измельчителей.

В зависимости от технологических условий расчета при помощи полученной методики могут решаться две основные задачи:

- 1) по заданным первоначальному и конечному размерам частиц материала определяются конструкционные параметры измельчителя (форма и взаимное расположение измельчающих элементов, их количество, параметры загрузочного и выгрузочного устройств и т.д.) и режим его работы;
- 2) для установки с известными конструкционными параметрами рассчитываются характеристики измельченного материала после выхода из измельчителя, т.е. оценивается пригодность использования конкретного аппарата для данного технологического процесса.

Практическая значимость полученных результатов. Экспериментальные исследования по диспергированию и механической активации ряда материалов позволили определить оптимальные режимы их обработки и дали возможность наметить наиболее перспективные на сегодняшний день направления использования разработанных нами аппаратов дезинтеграторного типа.

Их промышленные испытания в процессах подготовки алюминиевой пудры и активации цемента на АП «Минский комбинат силикатных изде-

лей», а также получения тонкодисперсного пектина на ОДО «Белрад», показали их высокую эффективность при незначительных энергопотребности и затратах на изготовление по сравнению с традиционными установками подобного назначения.

Результаты работы внедрены в производство в виде установки дезинтеграторного типа на ОДО «Белрад» в процессе получения пектинового порошка.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Система взаимосвязанных дифференциальных уравнений, описывающая процессы, происходящие при обработке материала в аппарате дезинтеграторного типа, и алгоритм расчета его оптимальных параметров.

2. Результаты экспериментальных исследований конструктивных и технологических параметров работы высоконапряженных измельчителей-активаторов дезинтеграторного типа.

3. Результаты промышленной реализации.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований докладывались на следующих конференциях:

52-я научно-техническая конференция, БГТУ, Минск, 2001.

Международная научно-техническая конференция «Интерстроймех-2002». – Могилев, 2002.

Международная научно-техническая конференция «Новые технологии в химической промышленности». – Минск, 2002.

Международная научно-техническая конференция «Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве стройматериалов». – Минск, 2003.

Международная Интернет-конференция «Технологические комплексы, оборудование предприятий строительных материалов и стройиндустрии». – Белгород, 2003.

Международная научная конференция «Центробежная техника – высокие технологии». – Минск, 2003.

Опубликованность результатов. Основные результаты диссертационной работы изложены в 5 научных статьях, 6 тезисах докладов на конференциях и 2 отчетах по НИР. Поданы две заявки на получение патента РБ: № а20030154 от 24.02.2003 г. “Дисмембратор со встроенным классификатором” и № а20040900 от 29.09.2004 г. “Дисмембратор с классифицирующей камерой”.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и приложений, содержит 55 иллюстраций и 13 таблиц. Список использованных источников имеет 138 наименований. Полный объем – 155 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Механоактивация материалов при диспергировании. Первая глава посвящена критическому анализу научно-технической и патентной литературы по исследуемой тематике. Приведен краткий анализ теорети-

ческих основ разрушения материалов с точки зрения энергетического подхода к оценке свойств твердых материалов. Рассмотрена сущность процессов, протекающих при диспергировании и механической активации материалов. Дана классификация и рассмотрены конструкционные отличия применяемых аппаратов, проанализированы недостатки в их работе. Определены основные направления их усовершенствования и применения.

Следует отметить, что на сегодняшний день значительно увеличилось число публикаций по данной тематике, появились монографии, сформировались различные научные школы и направления. В то же время, несмотря на обилие статей, излагающих теоретические положения, экспериментальные и практические исследования механоактивации, данные, полученные разными авторами, зачастую разрозненны и противоречивы, ощущается недостаток работ, в которых, для получения целостной картины этого сложного процесса, были бы обобщены и сведены в единое целое полученные результаты. Кроме того, все еще остается ряд плохо изученных вопросов, требующих самого пристального внимания: недостаточно изучено изменение скорости разрушения частиц материала в зависимости от их размера при обработке, слабо освещен процесс диссипации механической энергии в материале после окончания обработки, возникают трудности при расчете ряда конструкционных и технологических параметров измельчителей дезинтеграторного типа.

2. Моделирование процессов, протекающих в аппаратах дезинтеграторного типа. Несмотря на то, что измельчители дезинтеграторного типа находят применение в самых различных отраслях промышленности вследствие их компактности, относительно небольшой энергоемкости по сравнению с другими установками подобного назначения, а так же высокой энергонапряженности при взаимодействии материала с рабочими органами, до сих пор возникают трудности при их проектировании для конкретных промышленных условий. В частности, отсутствует зависимость для определения производительности измельчителей дезинтеграторного типа, учитывающая отличия в форме измельчающих элементов и их расположении друг относительно друга, влияние параметров загрузочного и выгрузочного патрубков, действительной концентрации материала в рабочей зоне и т.д. Нет единой инженерной методики определения оптимальных геометрических параметров и скорости движения рабочих органов аппаратов данного класса, что является одной из причин их относительно низкого КПД.

Решение всех этих проблем может быть обеспечено лишь путем разработки инженерной методики расчета основных конструктивных и технологических параметров аппаратов дезинтеграторного типа, базирующейся на детальном изучении процессов измельчения сыпучих материалов в агрегате с последовательным поэтапным анализом характера движения и физических превращений частиц обрабатываемого материала.

С точки зрения особенностей движения частиц и их взаимодействия с рабочими органами, в измельчителе дезинтеграторного типа можно выделить следующие основные зоны (рис. 1): I – загрузочный патрубок;

II – предпальцевое пространство; III – зона между рабочими поверхностями концентрического ряда подвижных пальцев; IV – пространство между рядами подвижных и неподвижных пальцев; V – область между рабочими поверхностями концентрического ряда неподвижных пальцев; VI – зона между рядами неподвижных и подвижных пальцев; VII – выгрузочный патрубок.

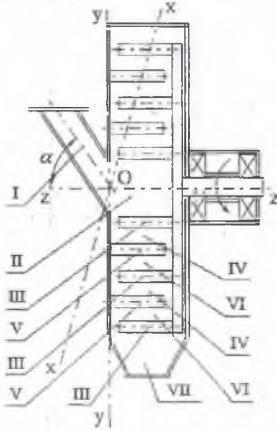


Рис. 1.

При этом расчет в каждой зоне имеет свою специфику вследствие того, что при прохождении по загрузочному и выгрузочному патрубкам, а также в предпальцевом пространстве материал не взаимодействует с подвижными органами измельчителя, и поэтому его движение можно рассматривать в неподвижной системе координат. При прохождении же остальных зон, движение необходимо рассматривать в системе подвижных координат, т.к. оно определяется характером ударного взаимодействия с вращающимися рабочими органами измельчителя. Поэтому в качестве основной выбрана пространственная система декартовых координат с центром в точке О (рис. 1), а взаимосвязанные граничные условия последовательного прохождения материала через каждую расчетную зону измельчителя определяются при рассмотрении движения частиц в каждой из зон по отдельности относительно общей системы координат. Движение частицы материала рассмотрено как движение материальной точки, вследствие незначительности ее размеров по отношению к размерам рабочих органов помольного аппарата, и описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_x(x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, t) \\ m\ddot{y} = F_y(x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, t) \\ m\ddot{z} = F_z(x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, t) \end{cases} \quad (1)$$

где x, y, z – проекции пути, пройденного частицей, на соответствующие оси координат; m – масса частицы; t – время движения частицы в рассматриваемой зоне.

При движении через расчетные зоны на частицу действуют следующие силы: тяжести; взаимодействия частицы с рабочим органом измельчителя; аэродинамическая сила, создаваемая вращающимся ротором; а также силы, обусловленные трением и подвижной деформацией частиц друг о

друга (электростатические силы, силы молекулярного взаимодействия, термофореза и т.д.). Причем теоретически учесть действие последних сил практически невозможно вследствие сложности определения направления и величины их действия (постоянно меняющихся). Поэтому в данной работе они учтены по аналогии с теорией расчета пневмотранспорта коэффициентом сопротивления движению, равным

$$k_c = (1 - k \cdot \mu), \quad (2)$$

где k – коэффициент местных аэродинамических сопротивлений; μ – концентрация аэроземеси в расчетной зоне.

Правильный выбор параметров загрузочного патрубка (его формы и угла установки) во многом определяет условия работы измельчителя дезинтеграторного типа. Причем на практике загрузочный патрубок, как правило, принимается из конструктивных соображений, в то время как для обеспечения оптимального режима работы измельчителя его пропускная способность должна соответствовать необходимой производительности установки.

В результате решения системы дифференциальных уравнений (1) применительно к загрузочному патрубку (расчетная схема сил, действующих при этом на частицу представлена на рис.2), получили условия входа частицы материала в предпальцевое пространство измельчителя: координаты точки входа (x_1 ; y_1 ; z_1), скорость U_{02} и ускорение a_{02} входа.

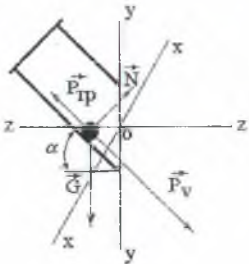


Рис. 2

В предпальцевом пространстве на частицу действуют сила тяжести G , сила инерции выхода из загрузочного патрубка P_1 , аэродинамическая сила P_{V2} , создаваемая подвижным рядом концентрически установленных пальцев, а также ряд сил, обусловленных трением и подвижной деформацией частиц при их соударении друг о друга, рассчитываемых аналогично, как и для предыдущей зоны с учетом изменения концентрации частиц (рис. 3).

Учитывая аэродинамику потоков и действующие на частицу силы, получили систему дифференциальных уравнений, описывающих ее движение в предпальцевом пространстве в виде

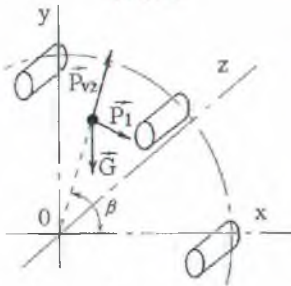


Рис. 3

$$\begin{cases} \ddot{x}_2 = \frac{6(1 - k_2 \mu_2) P_{V2} \cos \beta}{\rho_w \pi d^3} \\ \ddot{y}_2 = \frac{6(1 - k_2 \mu_2) (P_{V2} \sin \beta - P_1 \sin \alpha - G)}{\rho_w \pi d^3} \\ \ddot{z}_2 = \frac{6(1 - k_2 \mu_2) P_1 \cos \alpha}{\rho_w \pi d^3} \end{cases} \quad (3)$$

Время нахождения частицы материала t_2 в данной зоне ограничивается конструктивными параметрами измельчителя (диаметром установки пальцев и длиной их рабочей поверхности).

Понижая порядок дифференциальных уравнений в системе (3), и решая ее при помощи ЭВМ методом Рунге-Кутты, получили положение точки соприкосновения частицы с пальцем установки дезинтеграторного типа $\psi(x_2; y_2; z_2)$, скорость U_2 и ускорение a_2 с которыми частица входит в межпальцевое пространство, необходимые дальнейших расчетов.

Решение полученной системы уравнений графически представлено на рис. 4.

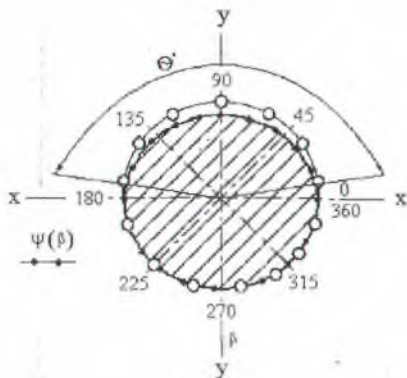


Рис. 4

Этот график показывает изменение координат входа частицы в межпальцевое пространство в зависимости от конструктивных особенностей аппарата (главным образом формы и угла установки загрузочного патрубка, а также профиля рабочих элементов) и частоты вращения ротора измельчителя. Для большей наглядности зависимость представлена в проекции на плоскость xOy . β –

текущий угол, определяющий положение координаты ψ в этой плоскости относительно оси вращения ротора. Заштрихованная область на графике соответствует области заполнения предпальцевого пространства материалом, Θ – угол, определяющий область пальцев измельчителя до которой частицы материала не долетают. При этом коэффициент загрузки внутреннего ряда пальцев установки (рис. 4) равен $k_{заг} = (360 - \Theta)/360$.

Причем для оптимальной работы необходимо, чтобы разрушение частиц материала происходило уже на первой ступени обработки, т.е. уже в зоне контакта частиц с пальцами первого (внутреннего) ряда.

Условие разрушения частицы при этом может быть записано как $U_{уд} = \vec{U}_2 + \vec{U}_n \geq U_{кр}$ (U_n – скорость движения пальца, определяемая частотой вращения ротора, на котором он установлен; $U_{кр}$ – критическая скорость разрушения частицы).

Размеры наибольшей частицы после ее разрушения рассчитывались по зависимости, полученной нами на основе анализа существующих теорий ударного разрушения и подтвержденной эмпирическим путем:

$$d = \frac{\sigma_{сж}^2}{p_u E M \rho_m U_{кр}^2}, \quad (4)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности измельчаемого материала при сжатии; p_u – вероятность центрального удара частицы о палец; E – модуль упругости первого рода; M – число твердости материала по шкале Мооса.

Вероятность прямого центрального удара учтена нами по аналогии с теорией расчета роторных дробилок как

$$p_u = 1 - \frac{h + 0,5(1 + \frac{U_n}{U_v})d_u}{m_2 \pi}, \quad (5)$$

где h – ширина рабочей поверхности измельчающего элемента (пальца); U_n – скорость движения пальца; U_v – скорость внедрения частицы; d_u – размер частицы; m_2 – модуль ротора, равный диаметру установки пальцев, деленному на количество пальцев в ряду.

При движении в межпальцевом пространстве материал вступает во взаимодействие с измельчающими элементами, установленными на вращающемся роторе. Поэтому движение частиц в принципе необходимо рассматривать в цилиндрической системе координат. При этом обычно вводят подвижную систему отсчета, а абсолютное течение потока аэросмеси определяют как сумму переносного и относительного течений. Однако, с учетом того, что движение частиц стеснено стенками аппарата, а так же, базируясь на методиках расчета центробежных пылевых вентиляторов и насосов для абразивных смесей, в данной работе оно рассмотрено как плоское (т.е. в полярной системе координат r и φ – рис. 5).

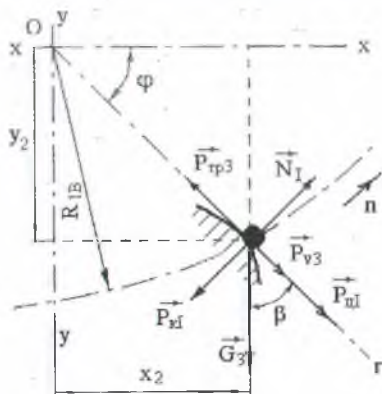


Рис. 5

При движении частицы в межпальцевом пространстве на нее действуют те же, что и в предыдущей зоне силы, плюс центробежная $P_{ш}$ и кориолисова $P_{кл}$ силы инерции, а так же силы, обусловленные ударным взаимодействием частиц с рабочими органами. При этом переносным движением считается поворот системы координат вокруг оси вращения ротора и уравнение движения частицы принимает вид (6).

Значение угла β , определяющего положение точки контакта частицы с пальцем, находится как $\operatorname{tg} \beta = y_2/x_2$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU_{3r}}{dt_3} - \frac{U_{3r}^2}{R} = (1 - k_3 \mu_3)(P_{v3} + G_3 \cos \beta - P_{mp3}) \\ \frac{dU_{3r}}{dt_3} + \frac{2U_{3r}U_{3\varphi}}{R} = (1 - k_3 \mu_3)G_3 \sin \beta \\ \frac{dR}{dt_3} = U_{3r} \\ \frac{d\varphi}{dt_3} R = U_{3\varphi} \end{array} \right. \quad (6)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (6) при помощи ЭВМ с использованием метода Рунге-Кутты дает нам значения осредненных скоростей частицы материала и воздушного потока на выходе из межпальцевого пространства: $U_3 = \sqrt{U_{3r}^2 + U_{3z}^2}$ и $U_3^e = \sqrt{(U_{3r}^e)^2 + (U_{3z}^e)^2}$ соответственно, а так же осредненные углы выхода воздушного потока β_{3a} и траекторий твердых частиц материала β_{3r} . Начальная скорость движения частицы принимается из условий входа частицы в межпальцевое пространство и рассчитывается решением системы дифференциальных уравнений (3).

Наибольшая энергонапряженность и интенсивность процесса измельчения материала достигается при оптимальном выборе конструктивных параметров рабочих элементов: минимальном расстоянии между концентрическими рядами пальцев и расстоянии между соседними пальцами одного ряда, обеспечивающем гарантированный контакт с частицей материала при ее прохождении сквозь ряд.

Для обеспечения оптимального режима работы измельчителя дезинтеграторного типа также немаловажное значение имеет выбор формы и размеров выгрузочного патрубка. При этом возможны две схемы отвода измельченного материала из аппарата дезинтеграторного типа: радиальная и тангенциальная. Оптимальный режим работы обеспечивается при расходе материала через отвод равном подаче в загрузочный патрубок при минимальных размерах выходного сечения выгрузочного патрубка, рассчитываемых из условия постоянства распределения момента скорости аэросмеси.

Производительность измельчителя дезинтеграторного типа определяется пропускной способностью внутреннего ряда пальцев. Для ее расчета нами предложены следующие формулы, полученные на основании рассмотренных выше взаимосвязанных систем дифференциальных уравнений, описывающих движение материала сквозь расчетные зоны измельчителя:

$$Q_{рад} = k_{заг} \mu_3 \rho_m n [\pi l_p \delta (D_1 - \delta) - l_p S_n \kappa_n], \quad (7)$$

– для установки с радиальной выгрузкой материала

$$Q_{тан} = k_{заг} \mu_3 \rho_m n [\pi l_p \delta (D_1 - \delta) - l_p S_n \kappa_n] \left(1 - \frac{90^\circ - \varphi_0}{360^\circ}\right), \quad (8)$$

где n – число оборотов ротора; δ – рабочая высота измельчающего элемента (пальца); D_1 – диаметр установки внутреннего ряда пальцев; l_p – длина рабочей поверхности пальца; S_n – площадь поперечного сечения пальца; κ_n – количество пальцев в ряду.

На базе полученной математической модели разработан алгоритм инженерной методики расчета основных параметров измельчителей дезинтеграторного типа. При этом в зависимости от технологических условий могут решаться две основные задачи:

1) по заданным первоначальному и конечному размерам частиц материала определяются конструкционные параметры измельчителя (форма

и взаимное расположение измельчающих элементов, их количество, параметры загрузочного и выгрузочного устройств и т.д.) и режим его работы;

2) для установки с известными конструкционными параметрами рассчитываются характеристики измельченного материала после выхода из измельчителя, т.е. оценивается пригодность использования конкретного аппарата для данного технологического процесса.

3. Экспериментальные исследования диспергирования и механоактивации в аппаратах дезинтеграторного типа. Потребность проведения экспериментальных исследований в первую очередь вызвана необходимостью проверки адекватности полученной модели расчета аппаратов дезинтеграторного типа, а так же необходимостью исследования ряда измельчителей, спроектированных и изготовленных нами в соответствии с данной методикой для конкретных промышленных условий, с целью установления оптимальных параметров их работы.

Эффективность помола какого-либо материала в мельнице ударного типа в значительной мере определяется скоростью взаимодействия частиц измельчаемого материала с рабочими элементами мельницы. При этом одной из основных характеристик измельчаемости частиц при ударном нагружении является критическая скорость разрушения. Однако, как показал критический анализ существующих зависимостей, все они имеют основной недостаток, заключающийся в наличии поправочных коэффициентов, зависящих от способа измельчения и конструкции измельчителя. Вследствие этого, при проектировании помольных установок дезинтеграторного типа возникают трудности, связанные с определением этих коэффициентов и в результате реальные скорости разрушения частиц материала значительно отличаются от подсчитанных по данным зависимостям.

С целью определения расчетной зависимости для нахождения критических скоростей разрушения частиц материала в измельчителях дезинтеграторного типа нами был проведен ряд экспериментальных исследований. В качестве исследуемых материалов были приняты гипсовый камень, известь и кварцевый песок. Данные материалы были выбраны из-за значительных отличий в их физико-механических свойствах и их широкого использования в промышленности.

Исследования проводились на специально сконструированной нами для этих целей лабораторной установке, в которой для обеспечения однократного ударного взаимодействия с частицами пальцы на роторе были смонтированы в один ряд. Диаметр ротора составлял 150 мм. Разрушение частиц обеспечивалось путем однократного пропускания исходного материала при различных частотах вращения ротора (от 500 до 6000 мин⁻¹). Для получения зависимости критической скорости разрушения от размера частиц материал перед измельчением рассеивался на наборе лабораторных сит. Затем каждая фракция обрабатывалась в экспериментальной установке, после чего вновь рассеивалась и по количеству материала, прошедшего сквозь сито с граничным размером для каждой фракции, определялся процент размолта частиц данного размера. В качестве экспериментальной кри-

тической скорости разрушения частиц принималась скорость, при которой происходило разрушение 100% частиц рассматриваемого размера.

Для получения функции, описывающей изменение скорости разрушения частиц материала в зависимости от их размера в мельницах дезинтеграторного типа, полученные экспериментальные данные были проанализированы с точки зрения существующих на сегодняшний день теоретических положений ударного разрушения твердых материалов. После их математической обработки на ЭВМ нами была получена общая для исследованных материалов зависимость, уже упоминавшаяся выше, в виде:

$$U_{кр} = \sigma_{сж} \sqrt{\frac{1}{\rho_v E \rho_w d M}} \quad (9)$$

Зависимость изменения скоростей разрушения частиц исследованных материалов от их размеров графически представлена на рис. 6 (1 – извести, 2 – гипсового камня, 3 – кварцевого песка).

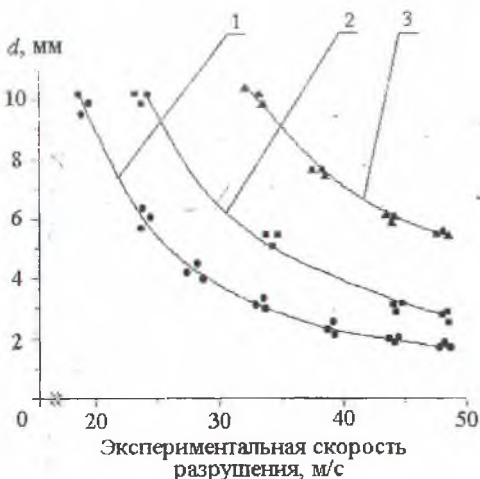


Рис. 6

Полученную зависимость (9) целесообразно использовать для ориентировочных расчетов критических скоростей разрушения частиц твердых материалов в измельчителях дезинтеграторного типа вследствие ее относительной простоты и достаточно высокой точности (расхождение расчетных значений с экспериментальными для исследованных материалов составило 10-15%).

Одним из наиболее перспективных направлений практического применения механохимической активации в промышленности на сегодняшний день является использование механохимических методов обработки вяжущих веществ с целью повышения их полезных свойств.

На данный момент имеется значительное количество работ, посвященных экспериментальному исследованию процессов, протекающих при активации цементов различных марок и назначений. Однако, большинство исследователей акцентирует внимание на изменении полезных свойств материалов (увеличении реакционной способности, повышении тонины помола и т.д.), не затрагивая вопрос затрат энергии на получение конкретного результата. В итоге может быть получен материал с уникальными свойствами, но не оправдывающий свое существование с экономической точки зрения.

Для механоактивационной обработки вяжущего нами в соответствии с полученной моделью расчета был спроектирован и изготовлен опытно-промышленный дисмембратор, характеризующийся повышенной напряженностью обработки материала при относительно небольших размерах рабочих органов и энергопотребности. Габаритные размеры установки составляют 640×440×340 мм, диаметр пятирядного фрезерованного ротора – 320 мм, производительность 250–300 кг/ч, мощность привода – 3 кВт.

С целью определения оптимальных параметров обработки цемента, нами был проведен ряд экспериментальных исследований, условия проведения которых моделировали технологические особенности производства железобетона и тротуарных плит (виброуплотнение и прессование образцов). Испытания бетонных образцов на прочность при сжатии проводились на гидравлической измерительной системе СИ-2-100-УХЛ 4.2.

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы.

Для полноценного протекания процесса твердения и набора прочности изделиями на основе механоактивированного цемента, оптимальной является его однократная дообработка при линейной скорости движения измельчающих элементов $V = 40\text{--}50$ м/с. При этом происходит увеличение его удельной поверхности $S_{уд}$ от 2500 см²/г до 4900 см²/г в соответствии с зависимостью, представленной на рис. 7.

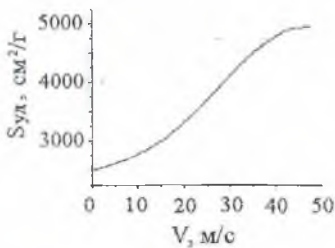


Рис. 7

Использование активированного цемента позволяет повысить прочность бетонных изделий при одинаковом содержании цемента в смеси на 15–35% (в зависимости от способа формования и условий твердения изделий), либо снизить расход цемента на 5–15% при получении равнопрочных изделий.

Максимальный эффект достигается при правильном сочетании таких параметров обработки вяжущих, как вид воздействия рабочих органов на материал, оптимальная энергонапряженность помольной установки, рациональный гранулометрический состав вяжущего, условия твердения.

Вместе с тем, в результате диссипации накопленной вяжущим энергии прочность камня, сформованного из активированного цемента, приблизительно через сутки приближается к прочности цементного камня на основе исходного (неактивированного) вяжущего. При этом наиболее резкий спад прочности наблюдается в первые два часа после активации, что говорит о необходимости внедрения активирующих установок непосредственно в линии производства бетонных и прочих изделий на основе вяжущих материалов.

Для получения зависимости энергозатрат, кВт, на получение необходимой удельной поверхности материала нами была получена эмпирическая зависимость в виде

$$\Xi = 0,0001 \Delta S_{уд}^{1,95}, \quad (10)$$

где $\Delta S_{уд}$ – необходимый прирост удельной поверхности материала в результате его дообработки, $\text{см}^2/\text{г}$.

Погрешность расчета по зависимости (10) в среднем составляет 2,5%.

Перспективным направлением применения дезинтеграторной обработки является производство порошкообразных медпрепаратов, в частности, бетаина гидрохлорида и тонкодисперсного пектина.

В настоящее время фармакологические предприятия Республики Беларусь, например РУП «Белмедпрепараты», при производстве ацединпепсина использует бетаин гидрохлорид, закупаемый в Германии. Причем из экономических соображений закупается грубодисперсный бетаин, вследствие чего для получения препарата, соответствующего стандартам качества, перед прессованием таблеток его приходится доизмельчать. Причем, как показали результаты измельчения бетаина в измельчителях раздавливающего и истирающего типа (бегуны, валковая мельница), их использование для решения этой проблемы малоперспективно вследствие налипания материала на рабочие органы, а также слипания и комкования материала на выходе. Поэтому одним из наиболее простых и дешевых решений данной проблемы является его дезинтеграторная дообработка.

Для определения необходимых параметров обработки бетаина гидрохлорида, позволяющих получать порошок требуемой дисперсности при минимальных затратах энергии, нами был проведен ряд исследований.

Исходный материал с удельной поверхностью 350–400 $\text{см}^2/\text{г}$ однократно обрабатывался в экспериментальном дисмембраторе при различных частотах вращения ротора, после чего определялся его фракционный состав с помощью ситового анализа и удельная поверхность на приборе ПСХ-8А.

Изменение гранулометрического состава в зависимости от скорости вращения ротора дисмембратора представлено на рис. 8.

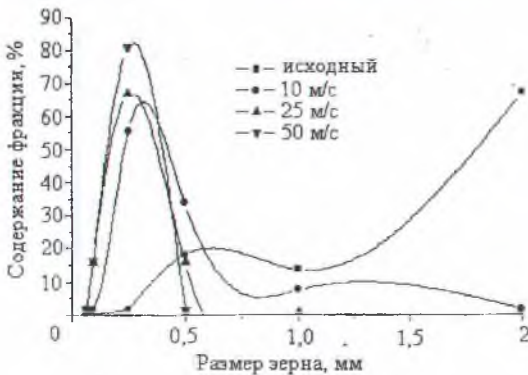


Рис. 8

Из графика видно, что эффективное измельчение бетаина гидрохлорида происходит при скоростях обработки порядка 50 м/с. Удельная поверхность порошка при этом составляет около 2000 $\text{см}^2/\text{г}$, содержание частиц основной фракции (0,2–0,25 мм) – 80%, что вполне достаточно для получения соответствующих стандарту ка-

чества таблеток.

В результате экспериментальных исследований по получению тонкодисперсного пектина из яблочного жома было установлено, что вследствие его плохой измельчаемости необходима многократная обработка в аппарате дезинтеграторного типа с одновременной классификацией обрабатываемого материала.

4. Практическая реализация исследованных аппаратов. В настоящее время наблюдается острая нехватка промышленного оборудования дезинтеграторного типа. Это связано с тем, что большинство исследователей движутся по пути увеличения энергонапряженности процессов диспергирования и механоактивации и расширения номенклатуры обрабатываемых материалов. В качестве оборудования используются высокооборотистые экспериментальные установки с частотой вращения роторов до 50000 мин^{-1} . Время их непрерывной работы при этом, как правило, незначительно, чего вполне достаточно для проведения лабораторных исследований. Однако при использовании в промышленных условиях такое оборудование характеризуется крайне низкой надежностью в работе, что главным образом и сдерживает его широкое распространение. Поэтому одной из основных проблем является разработка надежного и простого в работе и обслуживании оборудования.

На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований в соответствии с полученной методикой расчета аппаратов дезинтеграторного типа, нами, как уже упоминалось выше, было разработано и изготовлено несколько опытно-промышленных измельчителей-активаторов. Их промышленные испытания проведены на АП «Минский комбинат силикатных изделий» на стадии подготовки алюминиевой пудры при производстве газосиликатных изделий, а также для механоактивации цемента, используемого при производстве тротуарной плитки, и на ОДО ИРБ «Белрад» для помола яблочного жмыха при получении тонкодисперсного пектинового порошка, используемого в производстве сухого яблочного витаминизированного напитка «Витапект-2».

В результате промышленных испытаний на АП МКСИ было установлено, что при обработке в диспергаторе полностью разрушаются агломераты алюминиевой пудры, значительно повышается тонкость помола. При этом остаток на сите 0056 снижается с 0,3% до нуля. Использование обработанной в диспергаторе пудры алюминиевой ПАП-2 приводит к повышению физико-механических свойств и созданию более равномерной структуры газосиликатных изделий.

Промышленные испытания измельчителя-активатора дезинтеграторного типа для механоактивации цемента были осуществлены на АП МКСИ на стадии подготовки вяжущего (цемент М 500), используемого при производстве тротуарной плитки. После активации цемента на его основе была отформована опытная партия плитки. Как показали ее испытания на сжатие, прочность плитки на основе активированного цемента после 4-х сутокного

твердения составляла 24 МПа, после 7-ми суточного твердения – 31,72 МПа, что на 41% превышает значение, регламентированное ГОСТ-ом (24 МПа). При этом отформованная плитка отличается хорошим внешним видом, четкими гранями, отсутствием трещин и сколов.

Таким образом, можно сделать заключение о широких перспективах использования механоактиваторов дезинтеграторного типа в промышленности строительных материалов.

Для получения тонкодисперсного пектина нами была разработана и изготовлена установка дезинтеграторного типа, совмещающая измельчение и классификацию обрабатываемого материала. Как показали промышленные испытания, ее использование вместо струйной мельницы, применяемой на сегодняшний день, позволяет снизить энергозатраты на получение тонкодисперсного пектина в 10-12 раз при увеличении производительности в 2-3 раза. При этом в отличие от пектина, полученного в струйной мельнице, в готовом продукте отсутствуют включения машинного масла.

Установка внедрена в технологическую линию для получения тонкодисперсного пектина, используемого при производстве сухого яблочного витаминизированного напитка «Витапект-2» на ОДО «Белрад».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа научно-технической и патентной литературы определены перспективы использования дезинтеграторной техники для осуществления процессов диспергирования и механической активации при минимизации энергетических затрат [7].

2. Разработана система взаимосвязанных дифференциальных уравнений, описывающих движение и разрушение твердых материалов в аппаратах дезинтеграторного типа, учитывающая влияние сил взаимодействия частиц друг с другом и рабочими органами, изменение их концентрации и размеров при последовательном перемещении по рабочим зонам, влияние воздушного потока, а также условия входа и выхода материала [2].

3. Предложен алгоритм расчета аппаратов дезинтеграторного типа, охватывающий максимальное количество технологических и конструктивных параметров [3], и давший возможность выйти на более совершенные конструктивные решения, оформленные в виде заявок на изобретения [12].

4. Проведены экспериментальные исследования на различных материалах по определению скорости разрушения [8], степени измельчения, энергетических затрат, эффекта механической активации [2, 3, 9], позволившие подтвердить адекватность математической модели и установить области рационального использования аппаратов дезинтеграторного типа [6, 11].

5. Проведены промышленные испытания объекта исследований на АП «Минский комбинат силикатных изделий» на домоле алюминиевой пудры и механической активации цемента, а также на ОДО «Белрад» для помола яблочного жмыха с целью получения тонкодисперсного пектино-

вого порошка, показавшие его высокую эффективность и широкие перспективы использования в данных процессах [1, 5, 10].

6. Результаты работы внедрены в производство в виде установки дезинтеграторного типа на ОДО «Белрад» для получения пектинового порошка, используемого при производстве сухого яблочного витаминизированного напитка «Витапект-2», что дало возможность значительно снизить энергозатраты на проведение процесса и повысить качество готовой продукции.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Мурог В.Ю., Вайтехович П.Е., Костюнин Ю.М. Влияние использования активированного цемента на прочностные характеристики бетонных изделий. // Труды БГТУ. Сер. химии и технологии неорган. в-в. 2002. Вып. X. – С. 233-237.

2. Мурог В.Ю., Гарабажиу А.А. Методики расчета критических скоростей разрушения частиц материала в мельницах ударного действия // Труды БГТУ. Сер. химии и технологии неорган. в-в. 2003. Вып. XI. С 199-204.

3. Мурог В.Ю., Вайтехович П.Е., Костюнин Ю.М. Расчет производительности измельчителей дезинтеграторного типа // Труды БГТУ. Сер. химии и технологии неорган. в-в. 2003. Вып. XI. С 204-211.

4. Мурог В.Ю. Диссипация накопленной энергии в механоактивированном цементе дисембраторного приготовления. // Химическая промышленность. Т. 81, №5, 2004. С. 11-13.

5. Мурог В.Ю., Вайтехович П.Е. Влияние домола цемента на прочность бетонных изделий // Строительные материалы. №6, 2004. С. 36 – 38.

6. Мурог В.Ю., Костюнин Ю.М. Использование активированного цемента при приготовлении бетонных смесей // Тезисы докл. 52-ой научно-технической конференции. – Мн: БГТУ, 2001. – С 15-16.

7. Мурог В.Ю., Костюнин Ю.М. Перспективы использования механической активации вяжущих веществ на основе цемента. // Интерстрой-мех-2002: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: МГТУ, 2002. – С 364-366.

8. Мурог В.Ю., Гарабажиу А.А. Определение критической скорости разрушения частиц материала в мельницах ударного действия // Новые технологии в химической промышленности: Материалы докладов Международной научно-технической конференции. – Мн.: БГТУ, 2002. – Ч. 1. – С 249-251.

9. Мурог В.Ю., Францкевич В.С. Диссипация энергии в механически активированном цементе. // Технологические комплексы, оборудование предприятий строительных материалов и стройиндустрии: Сб. Докл. Международной Интернет-конференции. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. 2003. – С 115-116.

10. Мурог В.Ю., Вайтехович П.Е., Костюнин Ю.М. Получение тонкодисперсного бетаина гидрохлорида дезинтеграторным способом. // Но-

вейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов: Материалы докладов Международной научно-технической конференции. – Мн.: БГТУ, 2003. – С 122-124.

11. Мурог В.Ю., Вайтехович П.Е. Механоактивация вяжущих веществ в активаторах центробежного типа. // Центробежная техника – высокие технологии: Материалы докладов Международной научной конференции. – Мн.: НИРУП «Центр», 2003. С. 75-76.

12. Заявка на изобретение № а20030154 МКИ В 02С. Дисмембратор со встроенным классификатором / Мурог В.Ю., Вайтехович П.Е., Костюнин Ю.М. // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. Пат. Ведамства РБ. – 2004. – № 3. – С. 23.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'V. Yurog', is written diagonally across the page.

РЭЗІЮМЭ

Муроґ Віталій Юр'евіч

**Мадэліраванне працэсаў дыспергавання і механічнага
актывавання ў апаратах дэзінтэгратарнага тыпу**

ДЫСПЕРГАВАННЕ, МЕХАНІЧНАЕ АКТЫВАВАННЕ, ДЭЗІНТЭГРАТАР,
ДЫСМЕМБРАТАР, МАДЭЛІРАВАННЕ, ХУТКАСЦЬ РАЗБУРЭННЯ,
ІНТЭНСІФІКАЦЫЯ, ЭКСПЕРЫМЕНТ, УКАРАНЕННЕ

Аб'ектам даследаванняў служылі працэсы, якія адбываюцца ў хуткасных здрабняльніках-актыватарах дэзінтэгратарнага тыпу.

Мэтай дысертацыйнай работы з'яўлялася павышэнне эфектыўнасці апрацоўкі цвёрдых матэрыялаў у здрабняльніках-актыватарах дэзінтэгратарнага тыпу пры мінімізацыі энергетычных і капітальных выдаткаў.

У дадзенай рабоце на падставе крытычнага аналізу навукова-тэхнічнай інфармацыі разгледжана сутнасць працэсаў, якія адбываюцца пры дыспергаванні і механічным актываванні матэрыялаў у апаратах дэзінтэгратарнага тыпу. Прааналізаваны недахопы іх работы і вызначыны асноўныя напрамкі іх удасканалення і выкарыстання. Распрацавана методика разліку аптымальных канструкцыйных і тэхналагічных параметраў апаратаў дэзінтэгратарнага тыпу, якая грунтуецца на дэтальным мадэліраванні працэсаў здрабнення сыпчых матэрыялаў у аграгаце з паслядоўным паэтапным аналізам характару руху і фізічных ператварэнняў часцінак апрацаванага матэрыялу. На яе падставе разлічаны аптымальныя канструкцыйныя параметры тыповых апаратаў дэзінтэгратарнага тыпу, а таксама прапанаваны новыя канструкцыі, якія акрамя здрабнення і механічнага актывавання матэрыялу адначасова ажыццяўляюць яго класіфікацыю. Праведзены эксперыментальныя і прамысловыя даследаванні і выбрана вобласць рацыянальнага выкарыстання дэзінтэгратарнай апрацоўкі розных матэрыялаў.

Ажыццёўлена прамысловае ўкараненне распрацаванай устаноўкі дэзінтэгратарнага тыпу для атрымання пектынавага парашку на ТДА ІРБ "Белрад", што дазволіла інтэнсіфікаваць працэс і тым самым павысіць якасць гатовай прадукцыі пры зніжэнні агульных энергавыдаткаў.

Мурог Виталий Юрьевич

Моделирование процессов диспергирования и механической активации в аппаратах дезинтеграторного типа

ДИСПЕРГИРОВАНИЕ, МЕХАНОАКТИВАЦИЯ, ДЕЗИНТЕГРАТОР, ДИСМЕМБРАТОР, МОДЕЛИРОВАНИЕ, СКОРОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ВНЕДРЕНИЕ

Объектом исследований служили процессы, протекающие в высокоскоростных измельчителях-активаторах дезинтеграторного типа.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности обработки твердых материалов в измельчителях-активаторах дезинтеграторного типа при минимизации энергетических и капитальных затрат.

В настоящей работе на основании критического анализа научно-технической информации, рассмотрена сущность процессов, протекающих при диспергировании и механической активации материалов в аппаратах дезинтеграторного типа. Проанализированы недостатки в их работе и определены основные направления их усовершенствования и применения. Разработана методика расчета оптимальных конструктивных и технологических параметров аппаратов дезинтеграторного типа, базирующаяся на детальном моделировании процессов измельчения сыпучих материалов в агрегате с последовательным поэтапным анализом характера движения и физических превращений частиц обрабатываемого материала. На ее основании рассчитаны оптимальные конструкционные параметры типовых аппаратов дезинтеграторного типа, а также предложены новые конструкции, сочетающие в себе помимо измельчения и механоактивации классификацию обрабатываемого материала. Проведены экспериментальные и промышленные исследования и выбрана область рационального использования дезинтеграторной обработки различных материалов.

Осуществлено промышленное внедрение разработанной установки дезинтеграторного типа для получения тонкодисперсного неглинистого порошка на ОДО ИРБ «Белрад», что дало возможность значительно снизить энергозатраты и повысить качество готовой продукции.

SUMMARY

Murog Vitaly Jurjevich

Modelling of processes of dispergation and mechanical activation in the devices of dezintegration type

DISPERGATION, MECHANICAL ACTIVATION, DEZINTEGRATOR, DISMEMBRATOR, MODELLING, SPEED OF DESTRUCTION, EXPERIMENT, INTRODUCTION

As object of researches the processes proceeding in high-speed grinders - activators of dezintegration type served.

The purpose of dissertational work is increase of efficiency of processing of firm materials in grinders - activators of dezintegration type at minimization of power and capital expenses.

In the present work on the basis of the critical analysis of the scientific and technical information, the essence of the processes proceeding at dispergation and mechanical activation of materials in devices of dezintegration type is considered. Lacks of their work are analysed and the basic directions of their improvement and application are determined. The design procedure of optimum constructive and technological parameters of devices of dezintegration the type, basing on detailed modelling of processes of crushing of loose materials in the unit with the consecutive stage-by-stage analysis of character of movement and physical transformations of particles of a processable material is developed. On its basis optimum constructional parameters of typical devices of dezintegration type are designed, and also the new designs combining besides crushing and classification of a processable material are offered. Experimental and industrial researches are lead and the area of rational use of various materials is chosen.

Industrial introduction of the developed installation for reception a pectinaceous powder on society with the additional responsibility "Belrad" is carried out, that has enabled to lower considerably power inputs and to raise quality of finished goods.

Мурог Виталий Юрьевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ
И МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ В АППАРАТАХ
ДЕЗИНТЕГРАТОРНОГО ТИПА**

Подписано в печать 13.04.2005. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,3. Уч.-изд. л. 1,3.
Тираж 85 экз. Заказ **218**.

Учреждение образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220050, Минск, Свердлова, 13а.
ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220050, Минск, Свердлова, 13.
ЛП № 02330/0056739 от 22.01.2004.