

УДК 621.926

П. Е. Вайтехович

Белорусский государственный технологический университет

**АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ
И ИЗМЕЛЬЧАЮЩИХ АГРЕГАТОВ НА КАФЕДРЕ МАШИН
И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКИХ И СИЛИКАТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

В статье представлены результаты научной работы по исследованию процессов измельчения за последние двадцать лет. В качестве объектов исследования выбраны средне- и высокооборотные измельчающие агрегаты, имеющие большие перспективы использования в производстве. Характерной особенностью таких агрегатов является значительное влияние на процесс измельчения инерционных сил. Для оценки этого влияния введен инерционный фактор, представляющий отношение всех инерционных сил к силе тяжести. В качестве основного метода исследования принят метод моделирования, причем применительно к движению рабочих органов измельчителей и несущей среды. Дополнительный метод – экспериментальные исследования с переходом к промышленным испытаниям. Составлены математические модели движения измельчаемого материала по поверхности вращающегося диска, являющегося неотъемлемой частью многих мельниц. Определена траектория движения как одиночных частиц без соприкосновения с другими, так и с учетом взаимного трения и даже в виде слоя сыпучей среды. Установлены условия попадания частиц под размольный валок, величина и направление их скорости на выходе с диска. Рассмотрено движение мелющих тел и измельчаемого материала в высокооборотных центробежно-шаровых и планетарных мельницах. Определены режимы движения, дана оценка влияния инерционных сил на разрушающую способность шаров. Проведены экспериментальные исследования по сверхтонкому измельчению в шаровых мельницах с мешалками. Показано, что при соответствующих условиях в них возможно получение наночастиц.

Намечены перспективы дальнейшей научной работы. Они заключаются как в расширении числа объектов, так и в более глубоком изучении процесса разрушения, причем с учетом влияния инерционных сил. Обязательными для исследования являются сопутствующие процессы: аэро- и гидродинамика, классификация в комплексе с замкнутым циклом работы измельчителей, а также абразивный износ.

Ключевые слова: процессы измельчения, исследование, моделирование, измельчающие агрегаты, движение, рабочий орган, частица, силы инерции, инерционный фактор.

P. Ye. Vaytekovich

Belarusian State Technological University

**ANALYSIS OF THE RESEARCH OF THE PROCESSES OF CRUSHING
AND CRUSHING UNITS IN THE DEPARTMENT OF MACHINES
AND DEVICES OF CHEMICAL AND SILICATE PRODUCTION**

The article presents the results of scientific work on the study of grinding processes over the past twenty years. The objects of study were medium and high-speed grinding units, which have great prospects for use in production. A characteristic feature of such aggregates is a significant influence on the grinding process of inertia forces. To assess this effect, an inertial factor is introduced, representing the ratio of all inertial forces to gravity. The main research method is modeling, and in relation to the movement of the working bodies of shredders and the carrier medium. Additional method – experimental studies with a transition to industrial testing. Mathematical models of the movement of the crushed material on the surface of a rotating disk, which is an integral part of many mills, have been compiled. The trajectory of movement of single particles without contact with others, and taking into account mutual friction and even in the form of a layer of granular medium, is determined. The conditions for particles falling under the grinding roll, the size and direction of their velocity at the exit from the disk are established. The movement of grinding bodies and grinding material in high-speed centrifugal ball and planetary mills is considered. Modes of motion were determined, the influence of inertial forces on the destructive ability of the balls was evaluated. Experimental studies on superfine grinding in ball mills with mixers have been carried out. It is shown that nanoparticles can be obtained under appropriate conditions.

Prospects for further scientific work are outlined. They consist both in the expansion of the number of objects and in a deeper study of the process of destruction, taking into account the influence of inertial forces. The following processes are obligatory for research: aero- and hydrodynamics, classification in combination with a closed-loop operation of shredders, and also abrasive wear.

Key words: grinding processes, research, modeling, grinding aggregates, movement, working body, particle, inertial forces, inertial factor.

Введение. Процессы измельчения находят широкое использование в химических технологиях. Это производство калийных и фосфорных удобрений, лакокрасочной продукции. Часто встречаются измельчающие агрегаты в фармацевтической и пищевой промышленности. Но наибольшее распространение они получили в производстве строительных материалов. Именно там используются агрегаты большой единичной мощности. Их производительность достигает сотен тонн в час при мощности привода в несколько мегаватт. Общей и специфической особенностью всех процессов измельчения являются высокие удельные энергозатраты.

На первый взгляд эти процессы кажутся довольно простыми, но это впечатление довольно обманчиво. До сих пор не установлено четкого механизма разрушения твердых материалов, не говоря уже о взаимосвязи затрат энергии с дисперсностью готового продукта. Но все-таки дать качественную оценку отдельных стадий процесса измельчения удалось. Большая заслуга в этом принадлежит советским специалистам: Ребиндеру, Ходакову, Ревнивцеву [1–3].

При исследовании измельчающих агрегатов наблюдается две негативные тенденции. Первая из них заключается в том, что часто они имеют узкую технологическую направленность и ориентируются на помол какого-то конкретного материала. В противоположность этому, когда за исследования принимаются механики, то они рассматривают измельчающий агрегат как чисто механическую систему, не обращая внимания на перспективы его практического использования. Поэтому, начиная два десятилетия тому назад исследования по изучению процессов и агрегатов для измельчения, мы учитывали то, что сделано ранее, и старались ориентировать свою работу на преодолении нерешенных проблем.

Основная часть. В промышленности чаще всего для процессов помола используются тихоходные агрегаты, скорость движения которых не превышает 1 м/с. К такому относятся прежде всего барабанные шаровые мельницы. Это хорошо изученный и традиционно использующийся агрегат, имеющий ряд существенных недостатков. Он характеризуется высокой металлоемкостью и большими удельными энергозатратами на проведение процесса измельчения.

Интенсифицировать работу помольных агрегатов можно за счет увеличения скорости движения рабочего органа и измельчаемой среды. По этой причине в качестве объектов исследования были выбраны средне- и быстроходные измельчители, первый из которых раздавливающего, а второй ударного действия. Выбор в пользу указанных способов разру-

шающего воздействия был сделан по причине их меньшей энергоемкости [4]. Конкретно упомянутые способы реализовывались в среднеходной валковой мельнице (раздавливание), в дезинтеграторе (удар). Причем в качестве объединяющего параметра, характеризующего процесс измельчения, был выбран инерционный фактор [5]:

$$\Phi = \frac{\bar{F}_e + \bar{F}_c}{G}, \quad (1)$$

где F_e и F_c – инерционная центробежная и кориолисова силы, Н; G – сила тяжести частиц измельчаемого материала, Н.

Все силы в формуле (1) массовые и поэтому

$$\Phi = \frac{\bar{a}_e + \bar{a}_c}{g}. \quad (2)$$

Ввиду сложности процесса измельчения, недоступности зоны разрушения для установки контрольно-измерительной аппаратуры в качестве основного метода исследования было выбрано математическое моделирование, дополнительного – эксперимент. Следует отметить, что адекватность математических моделей подтверждалась экспериментально. Более того, все объекты исследований прошли через стадию промышленных испытаний, а некоторые из них внедрены в производство.

В результате исследования среднеходных мельниц удалось определить траекторию движения материала по вращающейся тарелке и установить условия гарантированного попадания его под размольные валки. Составлена математическая модель движения измельченных частиц в сепарационной зоне, что дало возможность осуществить ее конструктивное совершенствование и предотвратить их провал под тарелку. Предложены и апробированы модели разрушения материала под валком и работы мельницы в замкнутом цикле, позволяющие определить оптимальные значения производительности и удельных энергозатрат.

На основе решения уравнения движения частиц исходного продукта разработан метод определения коэффициента загрузки ударных мельниц, позволяющий рассчитать их максимальную производительность. В результате эксперимента найдены основные направления использования ударных измельчителей: грубый предварительный помол на стадии селективного измельчения материалов, измельчение мягких, малоабразивных материалов, а при значительном увеличении скорости движения рабочего органа и механическая активация, требующая значительной концентрации энергии в ограниченном пространстве.

Кроме названных объектов, на первом этапе для решения конкретной практической задачи, связанной с распушкой асбеста, использовался такой разрушающий физический эффект, как кавитация. Результаты исследований показали его высокую эффективность для данного процесса. Более того, нами составлена и апробирована математическая модель для расчета размеров и длины пробега кавитационных пузырьков, позволяющая сконструировать кавитаторы с геометрическими соотношениями, гарантирующими предотвращение их эрозионного износа.

Активные исследования процесса измельчения на протяжении первого десятилетия завершились защитой трех кандидатских [6–8] и одной докторской диссертации [9], рядом внедрений в производство. Вопросы, связанные с теорией измельчения, обобщены в монографии [4].

Вместе с тем на первом этапе исследований было установлено, что такие способы воздействия, как раздавливание (валковая мельница) и удар (дезинтегратор), пригодны в основном для тонкого помола, ограниченного размером частиц 20 мкм. Но современные технологии требуют использования частиц сверхтонкого помола (до 1 мкм) и даже наночастиц (менее 0,1 мкм). Из всех механических способов воздействия такие размеры достигаются только при истирании. В этой связи мы обратили внимание на шаровое измельчение, при котором реализуется комплексное воздействие на материал с присутствием всех упомянутых выше способов, в том числе и истирания. Для реализации указанного воздействия было решено использовать быстроходные измельчающие агрегаты: шарово-кольцевую и планетарную мельницы. Их особенность заключается в том, что значительное влияние на разрушение материала начинают оказывать инерционные силы. В планетарных мельницах, в которых инерционный фактор $\Phi > 400$, они становятся преобладающими.

Экспериментальные исследования показали, что в планетарной мельнице удельная поверхность измельченного продукта достигает $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$, что эквивалентно значительной доли частиц размером 5–10 мкм, соответствующих сверхтонкому помолу.

При исследовании быстроходных шаровых мельниц значительный прогресс достигнут в направлении моделирования движения элементов загрузки. Если раньше в основном рассматривалось перемещение отдельных частиц, то в этих агрегатах учтено взаимодействие между частицами материала и шарами. В центробежно-шаровой оно представлено в виде цепочки шаров с учетом силы трения между шарами соседних цепочек (рис. 1).

В планетарной мельнице (рис. 2) за счет учета силы тяжести G , инерционных сил F_{1e} , связанной с поворотом барабана и F_{2e} , связанной с его переносным движением, а также силы трения F_T между шарами в сегменте загрузки удалось определить зоны отрыва и безотрывного движения со скольжением и без него.

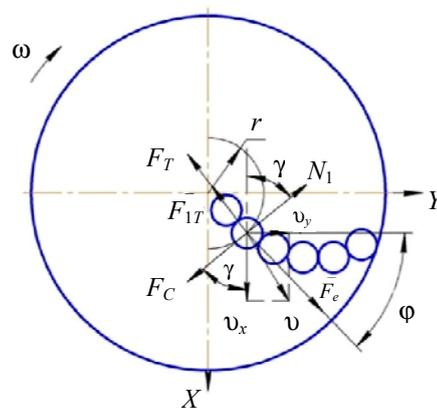


Рис. 1. Расчетная схема для определения силы трения F_{1T} между шарами

Каждая из указанных зон характеризуется преимущественным способом разрушающего воздействия – удар, истирание и раздавливание, соответственно.

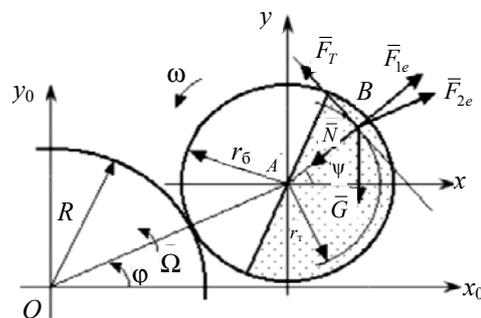


Рис. 2. Расчетная схема планетарной мельницы

Для определения силы трения использована модель послыного движения шаров (рис. 3).

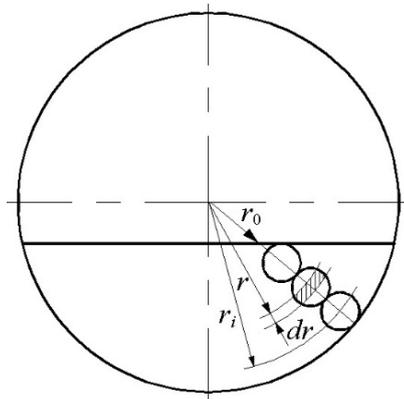


Рис. 3. Схема послыного движения шаров

На произвольном радиусе r_i выделялся элементарный участок dr по ширине столбика шаров. Записывалась сила давления для этого участка, а затем методом интегрирования получалась формула для ее расчета при любом значении радиуса r_i :

$$\tilde{F}_{ip} = 2r_m^2 g \left[\omega^2 \frac{(r_i + r_m)^2 - r_0^2}{2} + (r_i + r_m + r_0) \times \left[\frac{\omega^2 k^2 R}{1+k} \cos(\psi - \phi) - g \sin \psi \right] \right], \quad (3)$$

где r_m – радиус шара, м; $k = r / R$ – геометрический критерий.

По величине силы давления рассчитывалась сила трения $F_{it} = fN_i$, а $N_i = F_{ip}$, где f – коэффициент трения.

Учет всех сил позволил оценить величину разрушающих напряжений в различных зонах сегмента загрузки и их вклад в общий процесс разрушения материала.

Параллельно с исследованием быстроходных шаровых мельниц продолжались работы над совершенствованием измельчителей ударного действия. В частности, определялась скорость и траектория движения измельчаемого материала в межлопастном пространстве и вдоль лопастей ротора ударно-центробежной мельницы [10]. Эти исследования проводились совместно с НПО «Центр». Цель – определение скорости и угла соприкосновения частиц с лопастью и скорости на выходе из ротора. Первая из них является основным фактором, влияющим на абразивный износ, а вторая – на разрушение частиц при ударе об отбойную поверхность.

Анализ движения частиц из разных начальных точек межлопастного пространства (рис. 4) дал возможность определить угол атаки и скорость при соприкосновении частиц с лопастью.

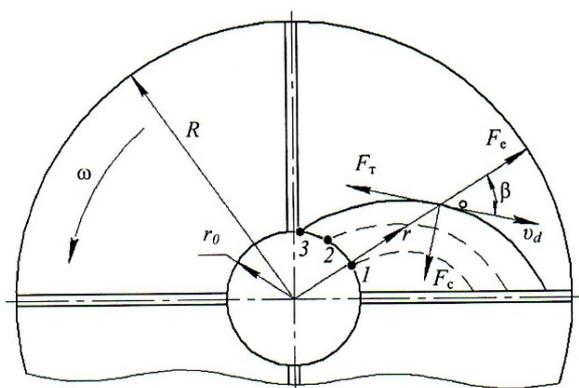


Рис. 4. Расчетная схема для определения траектории движения частиц по ротору ударно-центробежной мельницы

Расчеты проводились с использованием уравнений движения в проекциях на оси полярной системы координат:

$$\begin{cases} \ddot{r} - r(\dot{\phi})^2 = -fg \frac{\dot{r}}{\sqrt{(\dot{r})^2 + (r\dot{\phi})^2}} - 2\omega r\dot{\phi} + \omega^2 r, \\ r\ddot{\phi} + 2\dot{r}\dot{\phi} = -fg \frac{\dot{r}}{\sqrt{(\dot{r})^2 + (r\dot{\phi})^2}} - 2\omega\dot{r}. \end{cases} \quad (4)$$

В дальнейшем при движении вдоль лопасти из-за ограничения по угловой координате расчеты можно проводить по одному уравнению с переменной r . На выходе из ротора при этом определялась относительная скорость v_d . Векторная сумма этой скорости с переносной представляет полную скорость частицы, или по-другому, скорость удара. По величине этих скоростей можно прогнозировать величину абразивного износа и эффективность измельчения материала.

Принципиальным отличием исследований ударно-центробежных мельниц можно считать то, что здесь впервые движение измельчаемого продукта рассчитывалось не только в виде отдельных частиц, но и как сплошной сыпучей среды. В данном случае расчеты базировались на теории механики сыпучей среды [11], в которой за основу по аналогии с жидкостью принято уравнение Навье – Стокса. Отличие заключалось только в том, что вместо динамической вязкости жидкости принималась фиктивная вязкость сыпучей среды, определяемая экспериментально.

Для плоского осесимметричного движения по вращающемуся диску уравнение Навье – Стокса примет вид [12]:

$$\begin{cases} v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_\phi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right), \\ v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} - \frac{v_r v_\phi}{r} = v \left(\frac{\partial^2 v_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial r} - \frac{v_\phi}{r^2} \right). \end{cases} \quad (5)$$

Решение этих уравнений позволило с достаточно высокой точностью определить полную скорость и направление ее вектора на сходе с диска.

По результатам исследования ударно-центробежных мельниц был получен важный практический результат, заключающийся в том, что в этих агрегатах можно все-таки, несмотря на наши ранние утверждения, измельчать сильно абразивные материалы, например кварцевый песок. Простота и особенности конструкции позволяют существенно снизить износ или вообще избавиться от него. Во-первых, при определенном профиле лопастей на них может залипнуть слой измельчаемого материала,

обеспечивая самофутеровку. Во-вторых, наиболее изнашиваемые элементы можно обеспечить накладками из износостойчивого материала, например, карбида бора.

Для прогнозирования абразивного износа была разработана комбинированная модель его расчета, включающая ударный износ при соприкосновении частиц с лопастями и истирающий при движении вдоль них. В обоих случаях определяющими факторами являются скорость частиц относительно лопасти, а также угол атаки и давление на ней.

Несмотря на положительные результаты, исследования по ударному измельчению в центробежных мельницах и истирающему в быстрходных шаровых показали, что дисперсность конечного продукта не выходит за диапазон сверхтонкого измельчения. Получить наночастицы здесь не удастся из-за агломерации мелких частиц, даже при очень высоких скоростях вращения рабочего органа и добавлении антикоагулянтов.

Эта задача успешно решается при мокром помоле и сравнительно небольших частотах вращения рабочих органов в шаровых мельницах с мешалками [13]. Именно такой агрегат стал следующим объектом наших исследований. Основными узлами отмеченной мельницы являются горизонтальный корпус с циркуляционным контуром и рабочий орган, выполненный в виде вала, на который перпендикулярно насажены перемешивающие диски. Корпус заполняется измельчающими шарами диаметром менее 3 мм. Причем уменьшение размера мельющих тел приводит к повышению дисперсности (уменьшению размера) конечного продукта.

Пробные опыты показали, что, например, при помоле каолина шариками диаметром 1 мм в циклическом режиме за 30 мин мы получили суспензию со значительной долей частиц менее 0,1 мм (100 нм), рис. 5.

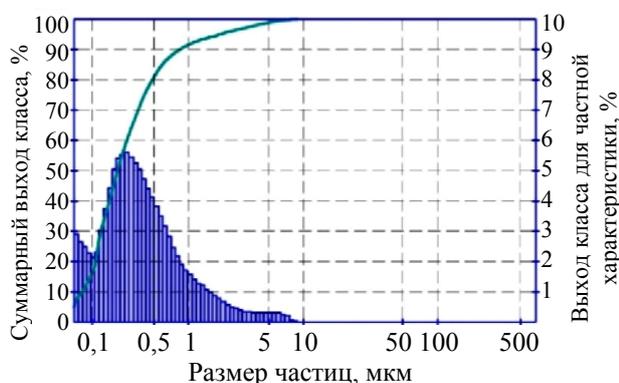


Рис. 5. Характеристика крупности помола в циклическом режиме измельчения

После конструктивного совершенствования, заключающегося в наклонной установке дисков и уменьшении диаметра шаров, подобный результат получен и при непрерывной работе мельницы.

Основным параметром, влияющим на эффективность измельчения в данной мельнице, является градиент скоростей в ее рабочем объеме. Значение скорости вблизи диска удалось определить по методу теории пограничного слоя [14] с использованием уравнения Навье – Стокса и компьютерной программы MathCad. А вот в междисковом пространстве, особенно при их наклонной установке, для решения этой задачи пришлось обратиться к компьютерной программе более высокого уровня – Ansys. Это можно считать началом нового этапа в исследовании измельчающих агрегатов.

В итоге за второй этап исследования процессов измельчения, датируемый 2010–2018 гг., защищены еще 3 кандидатские диссертации [15–17] и близка к завершению четвертая. Кроме того, написано и издано несколько учебных пособий, в которые включены результаты научных исследований.

Таким образом, научную работу по исследованию измельчающих агрегатов на кафедре машин и аппаратов за последние два десятилетия можно считать вполне успешной. Но с учетом того, что в процессе ее выполнения на кафедре сформировался творческий дееспособный коллектив, укомплектованный молодыми преподавателями в возрасте 30–40 лет, и что наука как сфера деятельности безгранична, исследования в начатом направлении надо продолжать. Причем их следует одновременно расширять и углублять. Расширение предполагает включение в сферу исследований новых измельчающих агрегатов, основанных как на чисто механическом воздействии, так и на различных разрушающих физических эффектах. Под глубиной следует понимать оптимизацию силового нагружения на измельчаемый материал, определение его напряженного состояния при разных способах воздействия и выход через это на реальные характеристики измельчающих агрегатов: производительность, дисперсность конечного продукта, удельные энергозатраты на проведение процесса.

Конкретно, например, по агрегатам раздавливающего действия необходимо провести исследования по оптимизации конструктивных элементов других среднеходных мельниц: шарово-кольцевых, роlikо-маятниковых, валковых с тороидальным валком. В них может быть рассмотрен и получить дальнейшее развитие процесс многоциклового раздавливающего разрушения, движения измельчаемого материала

как сыпучей среды. Возможно вовлечение в сферу исследований вообще всех валковых машин силового действия: дробилок, прессов, грануляторов. Важно установить при сжимающем усилии условия и границу перехода от прессования к разрушению, специфику грануляции материала.

Не менее важные задачи стоят и перед исследованиями ударного измельчения. Объектами исследования могут оставаться ударно-центробежные мельницы, дезинтегратор (дисмембратор) с вертикальным валом и компактным встроенным классификатором. Но одновременно поле деятельности можно расширить, переключившись на высокоскоростные струйные мельницы ударного действия, которые в определенных условиях обеспечивают сверхтонкий помол. С точки зрения теории самым главным является сам процесс ударного разрушения: количество циклов, дисперсность продукта, удельные энергозатраты. Нет полной ясности и в механической активации как в результате, преимущественно ударного разрушения. Естественно, что указанные выше параметры напрямую зависят от скорости движения материала и рабочих органов измельчающих машин.

Наиболее масштабные исследования проводились по шаровому измельчению с комбинированным воздействием на разрушаемый материал. Необходимо продолжить работы по изучению его напряженного состояния при каждом из способов: раздавливании, ударе, истирании. Оценке подлежит и вклад каждого из них в общий процесс разрушения. При этом, конечно, во взаимосвязи рассматриваются вопросы дисперсности и энергозатрат. Параллельно надо изучать возможность конструктивного совершенствования быстроходных шаровых мельниц. В частности, с этой точки зрения, интерес представляют различные модификации центробежно-шаровых и планетарных мельниц, например вертикальная. Требуют серьезной доработки планетарные мельницы непрерывного действия.

Если говорить отдельно о планетарном приводе, то исследования могут быть расширены на другие технологические машины с таким приводом. Это смесители, дисковые заглаживающие машины и другие агрегаты. В общем все, что связано с планетарными механизмами, может стать отдельным научным направлением с хорошими перспективами.

Особое место в исследованиях занимает шаровая мельница с мешалкой, в которой реализуется мокрый помол. Именно в ней получены частицы наноразмеров. Основной задачей дальнейших исследований является увеличение доли этих частиц в общей массе. С этой целью

необходимо идти по уже известному пути, связанному с уменьшением размера мелющих тел. Кроме того, можно совершенствовать конструкцию сепаратора, перемешивающих органов в направлении увеличения турбулизации элементов загрузки. И еще одно важное направление – это дополнительное измельчение материала одним из способов, основанных на физическом эффекте: кавитация, ультразвук и т. д. В теоретическом плане предстоит более детальное исследование трехкомпонентной системы. Здесь не обойтись без таких расчетных комплексов, как Ansys.

Кроме отдельных задач, по каждому направлению есть общие, характерные для всех процессов измельчения и различных измельчающих агрегатов. В первую очередь это все, что связано с замкнутым циклом работы высокоэффективных измельчителей. Они характеризуются пневматическим (гидравлическим) удалением измельченного материала, наличием сепарационной зоны и классификатора. Поэтому исследование аэро- и гидродинамики многофазного потока в сепарационной зоне, особенно вблизи классификатора, является весьма актуальной задачей. Эта задача в полной мере может быть решена только с помощью компьютерного моделирования и использования современных пакетов прикладных программ SolidWorks, Ansys. В принципе ее решение может стать отдельным научным направлением.

Еще одной важной задачей, связанной с замкнутым циклом, является совершенствование его математической модели, разработанной нами ранее [18]. Сюда же можно добавить необходимость модернизации существующих и разработки новых конструкций классификаторов, оптимизацию их геометрических параметров.

Актуальной задачей для всех исследуемых измельчающих агрегатов следует считать установление зависимости между дисперсностью конечного продукта и удельными энергозатратами. По этим двум параметрам выбирается наиболее рациональное направление их использования. Ну, и конечно, абразивный износ как неотъемлемый спутник всех процессов измельчения. В настоящее время составлена комбинированная модель для его расчета применительно к ротору ударно-центробежной мельницы [19]. А это важно для всех измельчающих агрегатов.

Заключение. Оценивая весь комплекс работ, выполненных по исследованию и моделированию процессов измельчения и измельчающих агрегатов за последние два десятилетия, их можно признать вполне успешными. Но на достигнутом нельзя останавливаться. Опыт организации научных исследований, и даже на нашей кафедре, показывает, что в случае остановки,

переориентации на другие направления находится тот, кто на базе наших данных начинает интенсивно развиваться и уходить вперед. Расхожее мнение о завершенности, отсутствии перспектив в данном направлении является ошибочным и просто вредным. Оно возникает при отсутствии основательной теоретической подготовки и нежелании работать. Еще раз повторюсь, что научная деятельность в любом направлении безгранична.

Еще одной опасностью следует считать распыление сил и времени на выполнение непро-

фильных разовых работ с целью достижения плановых показателей по финансированию научных исследований. Надеюсь, что этого с творческим коллективом кафедры не произойдет, и он останется верным выбранному ранее пути.

Нельзя обойти стороной проблему обновления кадров. В последние годы мы не можем укомплектовать аспирантуру кафедры из-за отсутствия квалифицированных, хорошо подготовленных студентов. Несмотря на это, автор с оптимизмом смотрит в будущее науки на кафедре.

Литература

1. Ребиндер П. А. Физико-химическая механика дисперсных структур. М.: Наука, 1966. 322 с.
2. Ходаков Г. С. Физика измельчения. М.: Недра, 1972. 308 с.
3. Селективное разрушение минералов / под ред. В. И. Ревнивцева. М.: Недра. 1988. 286 с.
4. Вайтехович П. Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил. Минск: БГТУ, 2008. 220 с.
5. Вайтехович П. Е. Критерий оценки силового инерционного воздействия в средне- и быстроходных измельчающих агрегатах // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2011. № 4. С. 25–28.
6. Петров О. А. Интенсификация процесса разрушения твердых материалов в скоростных гидродинамических диспергаторах: автореф. дис. ... канд. техн. наук / БГТУ, Минск, 2004. 20 с.
7. Мурог В. Ю. Моделирование процессов диспергирования и механической активации в аппаратах дезинтеграторного типа: автореф. дис. ... канд. техн. наук / БГТУ, Минск, 2005. 20 с.
8. Францкевич В. С. Оптимизация процесса помола хрупких материалов средней прочности в валково-тарельчатых мельницах с воздушной классификацией: автореф. дис. ... канд. техн. наук / БГТУ, Минск, 2007. 22 с.
9. Вайтехович П. Е. Процессы эффективного измельчения в агрегатах с инерционным воздействием на разрушаемый материал: автореф. дис. ... докт. техн. наук / МГУИЭ, 2011. 38 с.
10. Вайтехович П. Е., Гребенчук П. С., Таболич А. В. Модель движения материала в роторе-ускорителе центробежно-ударной мельницы // Труды БГТУ, 2014. № 3: Химия и технология неорг. в-в. С. 102–104.
11. Генералов М. Б. Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии. Калуга: Н. Бочкарева, 2002. 592 с.
12. Вайтехович П. Е., Гребенчук П. С., Таболич А. В. Движение измельчаемого материала по поверхности ускорителя ударно-центробежной мельницы // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 7. С. 7–8.
13. Козловский В. И., Вайтехович П. Е. Влияние конструктивных особенностей шаровой мельницы с мешалкой на ее эффективность // Лакокрасочные материалы и их применение. 2015. № 7. С. 43–45.
14. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
15. Семененко Д. В. Влияние конструктивных и технологических параметров горизонтальной планетарной мельницы на эффективность процесса измельчения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / БГТУ, Минск, 2013. 25 с.
16. Боровский Д. Н. Тонкое измельчение материалов малотоннажных производств в быстроходных центробежно-шаровых мельницах: автореф. дис. ... канд. техн. наук / БГТУ, Минск, 2015. 24 с.
17. Козловский В. И. Оптимизация процесса сверхтонкого помола в шаровой мельнице с мешалкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук / БГТУ, Минск, 2017. 25 с.
18. Вайтехович П. Е., Францкевич В. С. Оптимизация технологических параметров энергоэффективной валковой мельницы // Энергетика. Изв. ВУЗов. 2004. № 6. С. 59–64.
19. Вайтехович П. Е. Комбинированная модель абразивного износа лопастей ротора-ускорителя центробежной мельницы // Трение и износ. 2018. Т. 39, № 6. С. 573–581.

References

1. Rebinder P. A. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika dispersnykh struktur* [Physico-chemical mechanics of dispersed structures]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 322 p.
2. Khodakov G. S. *Fizika izmel'cheniya* [Physics of grinding]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 308 p.

3. Revnitshev V. I. *Selektivnoye razrusheniye mineralov* [Selective destruction of minerals]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 286 p.
4. Vaytehovich P. Ye. *Intensifikatsiya i modelirovaniye protsessov dispergirovaniya v pole inertsiyonykh sil* [Intensification and process modeling dispersion in the field of inertial forces]. Minsk, BGTU Publ., 2008. 220 p.
5. Vaytehovich P. Ye. Criterion for evaluating the force of inertial effects in medium and high-speed grinding units. *Kriteriy otsenki silovogo inertsiyonnogo vozdeystviya v sredne- i bystrokhodnykh izmel'chayushchikh agregatakh* [Chemical and oil and gas engineering], 2011, no. 4, pp. 25–28 (In Russian).
6. Petrov O. A. *Intensifikatsiya protsessa razrusheniya tverdykh materialov v skorostnykh gidrodinamicheskikh dispergatorakh. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Intensification of the process of destruction of solid materials in high-speed hydrodynamic dispersants. Abstract of thesis cand. of eng. sci.]. Minsk, 2004. 20 p.
7. Murog V. Yu. *Modelirovaniye protsessov dispergirovaniya i mekhanicheskoy aktivatsii v apparatakh dezintegratornogo tipa. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Modeling of dispersion and mechanical activation in disintegrator-type devices. Abstract of thesis cand. of eng. sci.]. Minsk, 2005. 20 p.
8. Frantskevich V. S. *Optimizatsiya protsessa pomola khrupkikh materialov sredney prochnosti v valkovo-tarel'chatykh mel'nitsakh s vozduшной klassifikatsiyey. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Optimization of the grinding process of fragile materials Medium strength in roll-disc mills with air classification. Abstract of thesis cand. of eng. sci.]. Minsk, 2007. 22 p.
9. Vaytehovich P. Ye. *Protsessy effektivnogo izmel'cheniya v agregatakh s inertsiyonnym vozdeystviyem na razrushayemyy material. Avtoref. dokt. tekhn. nauk* [Efficient grinding processes in aggregates with inertial effects on destructible material. Abstract of thesis doct. of eng. sci.]. Moscow, 2011. 38 p.
10. Vaitehovich P. Ye., Grebenchuk P. S., Tabolich A. V. Movement model material in the rotor accelerator centrifugal impact mill. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 3: Chemistry and Technology Neorganic Substances, pp. 102–104 (In Russian).
11. Generalov M. B. *Mekhanika tverdykh dispersnykh sred v protsessakh khimicheskoy tekhnologii* [Mechanics of solid dispersed media in processes chemical technology]. Kaluga, N. Bochkareva Publ., 2002. 592 p.
12. Vaytehovich P. Ye., Grebenchuk P. S., Tabolich A. V. Motion grinding material on the surface of the accelerator impact – centrifugal mill. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and Oil and Gas Engineering], 2015, no. 7, pp. 7–8 (In Russian).
13. Kozlovsky V. I., Vaytekhovich P. Ye. Impact of constructive features of a ball mill with a mixer for its efficiency. *Lakokrasochnyye materialy i ikh primeneniye* [Paints and varnishes and their use], 2015, no. 7, pp. 43–45 (In Russian).
14. Schlichting G. *Teoriya pogrannichnogo sloya* [Theory of the boundary layer]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 712 p.
15. Semenenko D. V. *Vliyaniye konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov gorizontallyykh planetarnoy mel'nitsy na effektivnost' protsessa izmel'cheniya. Avtoref. kand. tekhn. nauk* [Influence of constructive and technological parameters of the horizontal planetary mill on the efficiency of the grinding process. Abstract of thesis cand. of eng. sci.]. Minsk, 2013. 25 p.
16. Borovsky D. N. *Tonkoye izmel'cheniye materialov malotonnazhnykh proizvodstv v bystrokhodnykh tsentrobezhno-sharovykh mel'nitsakh. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Fine grinding of lightweight materials productions in high-speed centrifugal ball mills. Abstract of thesis cand. of eng. sci.]. Minsk, 2015. 24 p.
17. Kozlovsky V. I. *Optimizatsiya protsessa sverkh-tonkogo pomola v sharovoy mel'nitse s meshalkoy. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Optimization of the superfine grinding process in ball mill with agitator. Abstract of thesis cand. of eng. sci.]. Minsk, 2017. 25 p.
18. Vaytehovich P. Ye. Optimization of technological parameters energy efficient roller mill. *Energetika. Izv. VUZov* [Energy. University News], 2004, no. 6, pp. 59–64 (In Russian).
19. Vaytehovich P. Ye. The combined model of abrasive wear of blades rotor-accelerator centrifugal mill. *Treniye i iznos* [Friction and Wear], 2018, vol. 39, no. 6, pp. 573–581 (In Russian).

Информация об авторе

Вайтехович Петр Евгеньевич – доктор технических наук, доцент, доцент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: vpe51@mail.ru

Information about the author

Vaytekhovich Petr Evgen'yevich – DSc (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Productions. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vpe51@mail.ru

Поступила 11.04.2019