

621.9

Λ 34

УЧЕРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.928: 621.926.4

Левданский Александр Эдуардович

**НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРИМЕНЕНИЯ ПРОТОЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ
ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ
КЛАССИФИКАЦИИ И ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ**

05.17.08. — Процессы и машины химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Минск 2004

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты:

член-корреспондент НАНБ, доктор технических наук, профессор В. А. Бородуля, ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова» НАНБ, заведующий лабораторией дисперсных систем;

доктор технических наук, профессор А. В. Акулич, УО «Могилевский государственный университет продовольствия», заведующий кафедрой теплохладотехники;

доктор технических наук, профессор Л. А. Сиваченко, УО «Белорусско-Российский университет», кафедра строительно-дорожных и подъемно-транспортных машин и оборудования

Оппонирующая организация

Белорусский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной и химической промышленности ОАО «БЕЛГОРХИМПРОМ»

Защита диссертации состоится « 24 » ноября 2004 г. в 14.00 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.: (017) 226-14-32, 227-62-17; факс: (017) 227-62-17; 226-10-75; электронная почта: root.@bstu.unibel.by Телефон ученого секретаря совета: 226-00-39.

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

Автореферат разослан «27» сентября 2004 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
доктор технических наук,
профессор



В. А. Марков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Процессы тонкого измельчения и классификации находят самое широкое применение в различных технологиях. Измельчению подвергают как исходное сырьё, так и промежуточные продукты, а в ряде случаев и готовый продукт, который поставляется потребителю в виде порошков.

Одной из главных проблем при осуществлении процесса измельчения является высокое энергопотребление. Это подтверждается тем, что около 10 % производимой в мире электроэнергии затрачивается на процесс измельчения, а мощность привода мельниц в крупнотоннажном производстве достигает 8000 кВт. Высокие энергетические затраты объясняются не только большими объёмами перерабатываемых материалов, но и чрезвычайно низкой эффективностью измельчительных машин, особенно мельниц, КПД которых составляет в лучшем случае несколько процентов. Особенно резко снижается КПД и возрастает мощность привода мельниц с увеличением тонины помола. В то же время разработанные в последнее время высокоэффективные технологии требуют тонкого и сверхтонкого измельчения материалов. Для снижения энергозатрат и повышения эффективности процесса измельчения необходимо дальнейшее совершенствование существующих помольных агрегатов и создание принципиально новых конструкций.

В настоящей работе приведены теоретические и экспериментальные исследования по созданию новых конструкций классификаторов и ударно-центробежных мельниц агрегированных с такими классификаторами, высокая эффективность и низкое энергопотребление которых подтверждается широкомасштабным внедрением в различных производствах.

Разработанные новые способы и аппараты проточной классификации и измельчения могут быть использованы для интенсификации многих других технологических процессов, таких как растворение, обезвоживание, обеспыливание и т. д.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Работа выполнялась в соответствии с планами НИР по госбюджетной тематике Белорусского технологического института – тема № 36-96 “Разработка и исследование высокоэффективных машин и аппаратов”. Кроме того, работа выполнялась на основе планов Минского облигагропрома по техническому перевооружению сельского хозяйства на основе хозяйственных работ № 55-93, № 56-93, № 57-93 и № 29-97.

Внедрение результатов исследований постоянно координировалось с комитетом по надзору за рациональным использованием топливно-энергетических ресурсов при Минском облисполкоме.

Цель и задачи исследований. Целью исследований является решение важной народно-хозяйственной проблемы – создание высокоэффективных агрегатов для помола и классификации материалов на основе совершенствования этих процессов.

Высокая эффективность должна достигаться за счёт повышения качества помола и классификации, снижения энергоёмкости процесса измельчения и материалоемкости создаваемых агрегатов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

Белорусский государственный университет

62908

1. Провести теоретический анализ причин низкой эффективности используемых в производстве классификаторов и измельчителей и определить направления их совершенствования.

2. Разработать новый способ классификации, аппараты для его осуществления и на их базе создать новые конструкции измельчителей с непрерывной классификацией и удалением готового продукта из зоны измельчения с целью снижения энергозатрат на осуществление данных процессов.

3. Провести теоретические исследования проточной классификации и измельчения материалов с непрерывным отбором готового продукта.

4. Экспериментально исследовать эффективность и энергоёмкость новых способов классификаторов и мельниц с непрерывной проточной классификацией измельчённого продукта.

5. Провести широкомасштабные промышленные испытания новых конструкций классификаторов и мельниц на различных материалах и определить область их рационального использования.

Объект и предмет исследований. Объектом исследования являются процессы классификации и измельчения с целью разработки новых высокоэффективных и менее энергозатратных способов и на их основе создание и исследование новых конструкций мельниц и классификаторов.

Методология и методы проведения исследований. В основу методологии исследований положен комплексный подход, предполагающий проведение систематических исследований, анализ и обобщение особенностей процессов и явлений, наблюдаемых при проведении исследований. Выявлялись и анализировались факторы, позволяющие наиболее целесообразно и эффективно проводить дальнейшие исследования.

Основные допущения, принятые в работе, соответствуют тем положениям, которые являются общепринятыми в области процессов измельчения и классификации дисперсных материалов.

Экспериментальные исследования проводились с использованием комплекса стендовых установок, а также в условиях действующего производства на различных типоразмерах агрегатов с использованием для обработки опытных результатов известных приборов и методик.

Обработку экспериментальных данных и оптимизацию разработанных конструкций проводили с привлечением методов планирования и математической статистики, а также с использованием новейших программ компьютерной обработки.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Теоретически и экспериментально доказана возможность осуществления процесса сортировки на классы сыпучих материалов при движении их в перфорированных каналах под воздействием потока газа или жидкости. Созданы принципиально новые конструкции классификаторов проточной сортировки материалов, где в качестве движущей силы используется энергия гидродинамического воздействия газа или жидкости.

Изучена физическая модель и математически описан процесс проточной классификации материалов в перфорированных каналах новых конструкций классификаторов. На основании теоретического анализа и экспериментальных исследо-

ваний определены основные факторы, влияющие на эффективность сортировки материалов в разработанных конструкциях проточных классификаторов, получены полуэмпирические модели, на основании которых разработаны инженерные методики расчёта новых аппаратов.

Впервые предложено использовать способ проточной классификации в ударно-центробежных измельчителях, что позволило создать новый тип малогабаритных мельниц с непрерывным удалением из рабочей зоны продуктов измельчения заданного дисперсного состава при значительном снижении энергозатрат на процесс измельчения.

На основании теоретических и экспериментальных исследований определено влияние технологических и конструктивных параметров ударно-центробежных мельниц на эффективность измельчения материалов. Теоретически и экспериментально определены основные статьи расхода энергии в ударно-центробежных измельчителях, и получена математическая зависимость для расчёта мощности привода новых конструкций мельниц.

В работе получила дальнейшее развитие теория ударного измельчения, что позволило наметить пути и перейти к практическому созданию ударно-центробежных мельниц нового поколения, которые будут отличаться еще более низкой удельной энергоемкостью, высокой надежностью и низкой себестоимостью.

Промышленными испытаниями и внедрениями определена область широкого использования проточных классификаторов и измельчителей, позволяющих решить ряд важных народно-хозяйственных задач.

Практическая значимость полученных результатов. Создан новый класс оборудования для помола и классификации материалов, обладающий более высокими технологическими возможностями и во многом отвечающий требованиям интенсификации и повышения эффективности производственных процессов.

Разработанные варианты конструкций мельниц и классификаторов позволяют широко использовать их в химической, пищевой, фармацевтической промышленности, в производстве строительных материалов, сельскохозяйственном производстве и других производственных отраслях, что подтверждается тринадцатую актами промышленных внедрений.

Конструкции проточных классификаторов и ударно-центробежных мельниц позволяют получать продукт заданного гравулометрического состава как в сухом, так и в жидком виде, что обеспечивает спрос на них и в настоящее время процесс внедрения продолжается.

Особым спросом разработанные конструкции мельниц и классификаторов пользуются в сельскохозяйственном производстве при очистке и переработке зерна. Для сельскохозяйственных предприятий появилась возможность высококачественной очистки зерна, переработки его в крупу и тонкоизмельченную фуражную муку на отечественном оборудовании, стоимостью в 2-3 раза ниже импортного. Металлоёмкость разработанных мельниц и классификаторов, как минимум, в 2 раза ниже российских аналогов.

Внедрение в сельскохозяйственных предприятиях 64 мельниц для качественного измельчения фуражного зерна, 76 мельниц избирательного измельчения для шелушения зерна и производства крупы, 15 сепараторов для очистки зерна за

счёт экономии электроэнергии, топлива, снижения капиталовложений и других показателей позволили получить экономический эффект 2272 миллиона рублей. Для удовлетворения потребностей сельского хозяйства необходимо изготовить сотни единиц мельниц и сепараторов, и в настоящее время организовано их серийное производство, что позволяет отказаться от закупок данного оборудования по импорту, а в дальнейшем организовать их поставки на экспорт.

Результаты исследований используются в учебном процессе при чтении лекций, при проведении учебно-исследовательских занятий со студентами и в дипломном проектировании. Новизна и практическая значимость подтверждена 4 авторскими свидетельствами СССР на изобретение, 1 патентом Российской Федерации, 10 патентами Республики Беларусь.

Достоверность полученных результатов. Подтверждается хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также данными промышленной эксплуатации большого количества разработанных машин и аппаратов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

- результаты аналитических и экспериментальных исследований, направленных на обоснование целесообразности сортировки материалов проточной классификацией;
- новые высокоэффективные способы и аппараты проточной классификации материалов;
- модели и уравнения для расчёта процесса проточной классификации путём проточного воздействия на полидисперсный материал газового или жидкостного потоков;
- результаты экспериментальных и промышленных исследований новых конструкций проточных классификаторов;
- новые конструкции ударно-центробежных мельниц с непрерывной проточной классификацией измельчённого материала;
- результаты экспериментальных и промышленных исследований по эффективности измельчения и энергопотреблению новых конструкций измельчителей.

Личный вклад соискателя. Вклад автора диссертационной работы выражается в постановке задачи исследований, обеспечении её реализации, проведении экспериментальных исследований и анализе результатов, отражённых в работе, обобщении и формулировке основных положений и выводов. Выполнение экспериментальных исследований и опытно-промышленных испытаний новых конструкций классификаторов и мельниц проводилось при непосредственном руководстве и при личном участии автора. Все доклады, статьи и монография подготовлены при непосредственном и личном участии автора.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований были доложены и представлены в материалах 3-ей Всесоюзной научной конференции "Гидромеханические процессы разделения гетерогенных систем" (Тамбов, 1991 г.); на республиканском научно-техническом семинаре "Пути энергосбережения при производстве строительных материалов и конструкций" (Минск, 1998 г.); на международной научно-технической конференции "Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности" (Минск, 1998

г.); на международной научно-технической конференции "Разработка импортозамещающих технологий и материалов в химической промышленности" (Минск, 1999 г.); на международной научно-технической конференции "Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка" (Могилёв, 2000 г.); на международной научно-технической конференции "Ресурс- и энергосберегающие технологии в химической промышленности и производстве строительных материалов" (Минск, 2000 г.); на международной научно-технической конференции "Интерстроймех 2002" (Могилёв, 2002 г.); на международной научно-технической конференции "Новые технологии в химической промышленности" (Минск, 2002 г.); на международной научной конференции "Центробежная техника – высокие технологии" (Минск, 2003 г.); на международной научной конференции "Новейшие достижения в области импортозамещения химической промышленности и производстве строительных материалов" (Минск, 2003 г.).

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано: 1 монография в соавторстве; 1 учебное пособие, 29 статей в научных журналах и сборниках, 15 описаний изобретений. Всего список научных трудов по диссертации включает 66 наименований. Без соавторов опубликовано 4 статьи и 4 тезисов докладов на конференциях.

Структура и объём диссертации. Диссертация включает введение, общую характеристику работы, основную часть, состоящую из 5 глав, выводов, списка использованной литературы в количестве 276 наименований и приложения.

Полный объём диссертации составляет 327 страниц. В работе приведено 80 рисунков, имеется 2 таблицы. Объём, занимаемый иллюстрациями и таблицами, составляет 50 страниц. В работе содержится 18 документов об использовании материалов диссертации на 22 страницах и программы вычислений на 30 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Анализ процесса измельчения в промышленных агрегатах.

В первой главе проведен анализ энергозатрат на измельчение материалов. На основании теоретических расчетов и экспериментальных работ многих исследователей установлено:

♦ Во вновь разрабатываемых конструкциях мельниц необходимо создать условия, при которых процесс измельчения осуществляется за счет ударного нагружения.

♦ Желательно, чтобы в рабочую зону измельчителя материал поступал в небольших объемах, и как можно меньше в ней задерживался. В этом случае значительно меньше зерен материала будет подвергаться безрезультатному нагружению, а также снизятся затраты на трение частиц между собой и рабочими органами.

♦ Конструкция измельчителя должна быть такой, чтобы отношение объема его рабочей зоны к производительности было минимальным, а продукты помола должны немедленно выводиться из рабочей зоны и поступать на классификацию. Измельчающий и классифицирующий агрегаты должны компоноваться совместно, что позволит достигать минимальных затрат энергии на транспортировку.

❖ Применяемые в промышленности классифицирующие устройства имеют низкую эффективность, в результате чего зачастую более половины готового продукта снова возвращается в мельницу. Возврат мелкой фракции в зону измельчения снижает интенсивность помола и приводит к повышенному расходу электроэнергии. Следовательно, с созданием новых конструкций агрегатов для измельчения материалов необходимо создавать и высокоэффективные классификаторы, обеспечивающие качественное разделение продуктов помола.

2. Классификация сыпучих материалов. Анализ и исследования по проточному разделению продуктов измельчения.

Анализ работ по измельчению показывает, что для интенсификации и повышения эффективности этого процесса необходимо продукты помола постоянно выводить из камеры измельчения, не задерживая их в ней и направлять на классификацию. Недостатком всех промышленных воздушных сепараторов и гидравлических классификаторов является низкая разделительная способность. Кроме того, большинство классификаторов являются металлоемкими, крупногабаритными и трудно агрегируются с высокоскоростными измельчителями ударного действия, которые имеют небольшие размеры.

В последние годы для воздушной сепарации и гидравлической классификации полидисперсных материалов начинают использовать способ проточного разделения. При проточной классификации полидисперсные частицы движутся в сплошной среде вдоль проницаемой стенки. При наличии небольшого избыточного давления некоторая часть газа или жидкости будет проходить через отверстия перфорации проницаемой стенки. Естественно, вместе с газом и жидкостью через отверстия перфорации будут проходить и твердые частицы определенного размера. Так как скорость потока вдоль перфорированной стенки должна быть достаточно высокой, то частицы твердой фазы будут подходить к отверстиям под острым углом и, следовательно, в отверстия будут попадать те из них, размер которых будет намного меньше размера отверстий, что исключает забивку решетки частицами близкими по размерам к размеру отверстий.

В настоящее время известно несколько конструкций таких классификаторов, например, дуговой грохот или проточный сепаратор с вращающимися перфорированными барабанами. Эти аппараты весьма успешно используются в мельничных агрегатах зарубежного производства. Публикации по исследованию проточных классификаторов практически отсутствуют. Аппараты проточной классификации являются компактными, высокоэффективными и легко агрегируются с высокоскоростными мельницами ударного измельчения.

Прежде чем рассматривать процесс проточной классификации рассмотрено движение однофазного потока в канале с оттоком через перфорированное днище.

Профиль скорости газового потока вблизи перфорированной стенки при наличии фильтровального оттока через отверстия перфорации определяется путем совместного решения уравнений Навье-Стокса и неразрывности.

Принимая, что распределение скоростей не зависит от текущей длины канала x , то есть $\frac{\partial W_x}{\partial x} = 0$, и отток по всей длине перфорированной стенки равномерный, решение системы уравнений позволяет получить зависимость для описания профиля скорости потока в канале с проницаемым дном

$$W_{x(y)} = W_{x\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{W_y y}{\nu}\right) \right] \quad (1)$$

где $W_{x\infty}$ — скорость потока в центре канала; W_y — скорость оттока, отнесенная ко всей перфорированной поверхности; y — расстояние от перфорированной стенки.

Касательное напряжение на перфорированной стенке равно:

$$\tau_0 = \rho(-W_y)W_{\infty} \quad (2)$$

Следовательно, τ_0 не зависит от вязкости. Зависимость (1) позволяет рассчитать скорость потока вдоль проницаемой стенки, и далее воздействие его на частицы твердой фазы, движущиеся вдоль перфорированной поверхности. Скорость оттока

$$W_y = W_{ист} C \quad (3)$$

где C — доля живого сечения отверстий перфорации; $W_{ист}$ — скорость потока в отверстиях перфорации.

Исследования, проведенные в данной работе, а также работы других авторов показывают, что скорость истечения $W_{ист}$ зависит от скорости потока вдоль фильтровальной перегородки W , и с увеличением последней скорость истечения, то есть коэффициент сопротивления ξ , возрастает. Проведенные исследования и обработка опытных данных позволили получить зависимость для расчета скорости истечения при наличии потока вдоль фильтровальной перегородки

$$W_{ист} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi_0 \left(\frac{W_{ср}}{W_{ист}} \right)^{1,2}}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (4)$$

Для изучения процесса проточной классификации рассмотрено движение единичной частицы в горизонтальном канале с перфорированным дном под воздействием газового потока. Проведен анализ сил, которые могут воздействовать на частицу, и определены условия прохождения частицы через отверстия перфорации. Получена математическая зависимость для расчета минимальной ширины щели (b) для прохождения через нее частицы (δ) в зависимости от продольной скорости несущего газового потока, скорости его истечения в щелях, его вязкости и плотности частиц и газа. На основании этой зависимости проведен расчет и построены графики влияния выше названных параметров на минимальный размер щели для удаления из канала частиц заданного размера. Графические зависимости показывают, что для всех реальных случаев в щель смогут проходить частицы в несколько раз меньше ширины щели. Следовательно, забивка щелей частицами при проточной классификации исключается, а изменяя параметры газового пото-

ка и размеры отверстий перфорации, можно легко регулировать размер граничного зерна.

Проточным способом можно разделять не только полидисперсные порошки, но и классификацию суспензии, например в дуговых грохотах. В главе 4 приведена конструкция ударно-центробежной мельницы мокрого помола, в которой отделение готовой фракции из пленки суспензии так же осуществляется проточным способом. Так как в литературе информация по данному процессу практически отсутствует, были проведены теоретические и экспериментальные исследования по классификации суспензий в наклонном лотке с перфорированным днищем. Совместным решением уравнений Навье-Стокса и неразрывности получена зависимость для определения среднерасходной скорости пленки суспензии

$$U_{н.р.} = \frac{1}{h_{н.п.}} \left(\frac{g v_c \sin \alpha}{U_y^2} e^{\frac{|U_y| h_{н.п.}}{v_c}} \left(h_{н.п.} + \frac{v_c}{|U_y|} e^{\frac{|U_y| h_{н.п.}}{v_c}} - \frac{v_c}{|U_y|} \right) - \frac{g h_{н.п.}^2 \sin \alpha}{2 |U_y|} \right) \quad (5)$$

где U_y — скорость оттока суспензии, определяемая по уравнениям (3) и (4); $h_{н.п.}$ — толщина пленки суспензии; α — угол наклона лотка; v — вязкость суспензии, определяемая по известной зависимости Хаппеля.

Уравнение (5) является трансцендентным и решалось численным методом на ЭВМ. При экспериментальных исследованиях движения суспензии в лотке с оттоком проводились замеры толщины пленки, а также определялся размер частиц твердой фазы прошедших вместе с жидкостью через отверстия перфорации днища. При сравнении установлено, что в реальных условиях скорость пленки суспензии несколько ниже расчетной. Это объясняется тем, что уравнение не учитывает взаимодействие частиц суспензии между собой, с поверхностью стенок и перфорированного днища. Поэтому для более точного расчета скорости пленки необходимо вводить поправочный коэффициент A , учитывающий этот фактор.

$$U_{н.п.} = U_{н.р.} (1 - A) \quad (6)$$

Обработка опытных данных позволила получить эмпирическую зависимость для расчета коэффициента A .

$$A = 0,73 \varphi^{0,3} \left(\frac{U_y c}{U_{н.п.}} \right)^{0,55} \left(\frac{\rho_s}{\rho_{ж.}} \right)^{0,25} \quad (7)$$

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили выдать рекомендации для расчета классификаторов типа дуговых грохотов, а также узла классификации ударно-центробежных мельниц мокрого помола.

3. Разработка конструкций проточных классификаторов и их теоретические и экспериментальные исследования

3.1. Разработка новых конструкций проточных классификаторов

Результаты теоретических и экспериментальных исследований по проточной классификации были положены в основу при разработке целой серии новых конструкций воздушных и гидравлических классификаторов. Две конструкции из

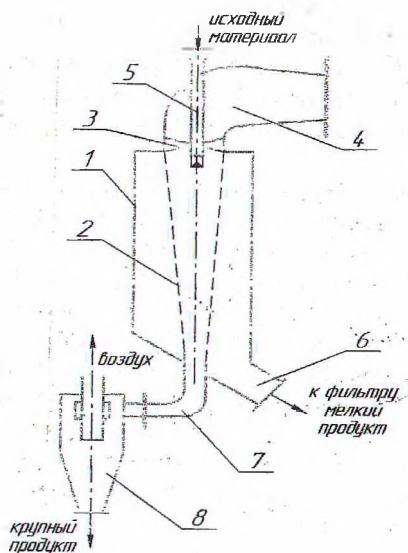


Рис. 1. Газо-центробежный сепаратор

1 – корпус; 2 – перфорированный конический элемент; 3 – многолопастной завихритель; 4 – патрубок подачи воздуха; 5 – патрубок подачи материала; 6 – патрубок отвода мелкой продукта и воздуха; 7 – патрубок отвода крупного продукта; 8 – циклон.

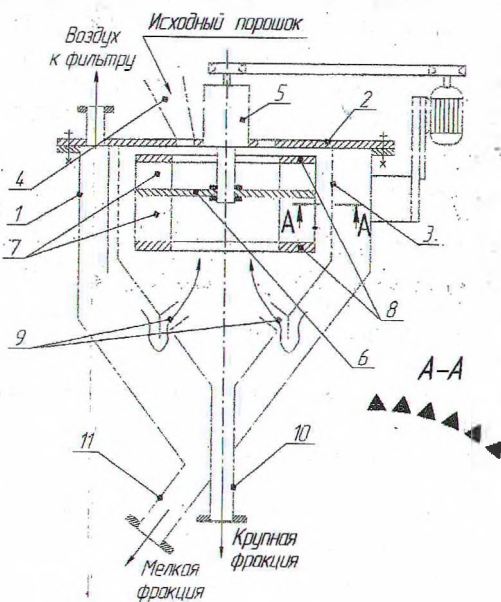


Рис. 2. Роторно-центробежный сепаратор

1 – корпус; 2 – крышка; 3 – перфорированный цилиндрический рабочий элемент; 4 – патрубок подачи воздуха и исходного материала; 5 – вал с подшипниковым узлом; 6 – диск; 7 – лопатки; 8 – кольца; 9 – окна циркуляции воздуха; 10 – патрубок отвода крупного продукта; 11 – патрубок отвода мелкого продукта.

этой серии проточных классификаторов представлены на рис. 1 и 2. Они могут использоваться для разделения на фракции полидисперсных порошков или суспензий. Рабочим элементом этих конструкций является перфорированный элемент конической (рис. 1) или цилиндрической (рис. 2) формы, который может быть выполнен из сетки, перфорированного листа или набран из специальных стержней треугольного сечения.

В первой конструкции (рис. 1) полидисперсный порошок вместе с воздухом подаётся вовнутрь перфорированного элемента. При прохождении многолопастного завихрителя воздух приобретает вращательное движение, подхватывает твёрдые частицы и отбрасывает к перфорированной стенке. Давление вращающегося воздушного потока у стенки элемента будет повышенным, и часть воздуха будет проходить через отверстия перфорации, вовлекая при этом с собой мелкие частицы порошка. Так как частицы будут подходить к отверстиям под острым углом, то через них могут пройти только частицы, размеры которых значительно меньше размеров отверстий. Из корпуса мелкие частицы вместе с воздухом поступают в циклон и фильтр на разделение. Крупные частицы опускаются вниз элемента и с оставшимся газовым потоком также поступают на разделение в циклон. Во второй конструкции классификатора (рис. 2) полидисперсный порошок вместе с воздухом подаётся к цилиндрической перфорированной обечайке с помощью вращающегося диска с лопатками. У перфорированной стенки также создаётся вихревое движение воздуха и полидисперсных частиц, и процесс разделения происходит аналогично предыдущей конструкции. Наличие лопаток снизу вращающегося диска позволяет организовать циркуляцию воздуха внутри классификатора, дополнительно воздействовать на вращающийся аэрозольный поток у перфорированной обечайки и тем самым повысить качество фракционирования порошка.

С целью разработки инженерной методики расчёта проточных конструкций классификаторов проведены теоретические и экспериментальные исследования.

3.2. Исследование газо-центробежного классификатора

При исследовании газо-центробежного классификатора (рис. 1) определялись:

- * длина перфорированного элемента, на котором частица сыпучего материала, двигаясь от центра, достигает его поверхности;
- * оптимальный диаметр отверстий перфорации в зависимости от требуемого размера граничного зерна разделения;
- * оптимальная длина перфорированного элемента, необходимая для осуществления более полного процесса разделения;
- * влияние конструктивно-технологических параметров на эффективность классификации.

Движение частиц материала в элементе под воздействием газового потока и длина участка элемента, на которой они подойдут к перфорированной стенке рассчитывались с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} m \left(\frac{dV_r}{dt} - \frac{V_\varphi^2}{r} \right) = \sum F_r \\ m \left(\frac{dV_\varphi}{dt} + \frac{V_\varphi \cdot V_r}{r} \right) = \sum F_\varphi \\ m \frac{dV_x}{dt} = \sum F_x \end{cases} \quad (8)$$

Проведён анализ сил, действующих на частицу, и установлено, что основными из них являются сила лобового сопротивления и сила тяжести. Скорость газового потока в перфорированном элементе имеет сложный характер и для расчёта движения частиц по уравнениям (8) значения всех составляющих скорости газового потока использовались зависимости, полученные в других работах опытным путём при адекватных условиях.

Система дифференциальных уравнений (8) решалась на ЭВМ численным методом для частиц диаметром от 0,05 до 0,5 мм при изменении среднерасходной скорости в элементе от 8 до 16 м/с. При этом угол наклона лопастей завихрителя α изменяется от 15° до 45°. Решение системы уравнений позволяет определить угол подхода частицы к перфорированной стенке и все составляющие скорости частицы V_r , V_φ и V_x . Дальнейшими теоретическими исследованиями рассчитывались условия прохода частицы размером δ через отверстия перфорации. По результатам этих исследований получено квадратное уравнение для расчёта необходимого диаметра отверстий перфорации d , через которые будут проходить частицы с размером, равным и меньшим δ

$$\frac{0,36\rho_e W_{ум}^2 \left(d - \frac{\delta}{2} \right)}{2\delta\rho_e V_{zn}^2} + \frac{V_r \left(d - \frac{\delta}{2} \right)}{V_{zn}} - \frac{\delta}{2} = 0 \quad (9)$$

где V_{zn} — результирующая осевой и тангенциальной скорости частицы над отверстием, т. е. скорости частицы вдоль перфорированной поверхности элемента; ρ_e — плотность газа.

Для проведения расчётов по уравнению (9) необходимо знать скорость истечения газа через отверстия перфорации, которая в свою очередь зависит от давления, создаваемого вихревым потоком у стенки. Имеющиеся в литературе попытки определить величину давления у стенки аналитическим способом существенно расходятся с реальными данными. Поэтому на основании проведённых экспериментальных исследований получена эмпирическая зависимость для расчёта давления, создаваемого закрученным газовым потоком у стенки элемента, учитывающая основные факторы, влияющие на этот показатель:

$$\Delta P = 80\rho_e W^2 \left(\frac{L}{D} \right)^{-0,5} \cdot e^{\frac{1}{0,95c}} \cdot e^{\frac{1}{5,38 \sin \alpha}} \quad (10)$$

где W — осевая скорость газового потока; $\frac{L}{D}$ — соотношение длины и диаметра элемента; c — концентрация твёрдой фазы в газовом потоке кг/м^3 ; α — угол наклона лопастей завихрителя.

Теоретическими расчётами с использованием системы уравнений (8) определены значения осевой, радиальной и тангенциальной составляющих скорости частицы при подходе её к перфорированной стенке. Результаты расчётов, полученные при угле наклона лопастей завихрителя $\alpha=37^\circ$ и размере частиц песка 0,5 мм, представлены на графике (рис. 3).

Одновременно с кинетическими характеристиками производится расчёт длины элемента, на которой частицы, двигаясь от центра, достигнут стенки. Расчёты производились при изменении: размера частиц от 0,05 до 2 мм, среднерасходной скорости газового потока в элементе $W=7\div 15 \text{ м/с}$, угле наклона лопастей завихрителя $\alpha=15\div 45^\circ$ и плотности частиц $\rho=900\div 3000 \text{ кг/м}^3$. Проведённые расчёты проверялись позже на экспериментальной установке. На графике (рис. 4) все расчётные зависимости приведены в виде кривых, а экспериментальные данные нанесены в виде точек. Сравнение экспериментальных данных и расчётных кривых показывает хорошую их сходимость.

Анализируя полученные теоретические и экспериментальные данные, представленные на рисунке (рис. 4), можно с достаточной точностью утверждать, что длину первого участка рабочего элемента следует принимать равной двум его входным диаметрам, кроме того, этот участок следует выполнять неперфорированным, что исключит необоснованную потерю газовой среды из элемента и сохранит более устойчивую крутку газового потока.

Произведя все теоретические расчёты по определению всех составляющих скорости частицы (рис. 3) при подходе к перфорированной стенке и величины угла подхода, а также получив экспериментальную зависимость для определения давления газового потока у стенки элемента (10), по уравнению (9) был произведён расчёт минимального размера отверстий перфорации для прохождения частиц заданного размера δ . В работе в виде графиков приведены расчётные зависимости по влиянию плотности фаз, скорости газового потока, степени его закрутки на граничный размер отверстий перфорации.

Дальнейшие экспериментальные исследования проводились с целью изучения влияния технологических и конструктивных параметров на качество разделения полидисперсных материалов в газо-центробежных классификаторах. Результаты исследований по влиянию среднерасходной скорости газа в рабочем элементе на эффективность классификации представлены на графике (рис. 5). Из графиков видно, что оптимальная скорость газа в элементе, при которой достигается наиболее высокая эффективность классификации, равна $10\div 12 \text{ м/с}$. На графике приведены результаты выделения из полидисперсной смеси различных классов. Так кривая 1 показывает, что мелкие частицы класса $0\div 125 \text{ мкм}$ отделяются в классификаторе практически полностью. Несколько хуже идёт выделение из смеси частиц размером $125\div 180 \text{ мкм}$. Частицы размером $180\div 315 \text{ мкм}$ выделяются из смеси около 55–60 %, что вполне объяснимо, так как граничный размер разделения для

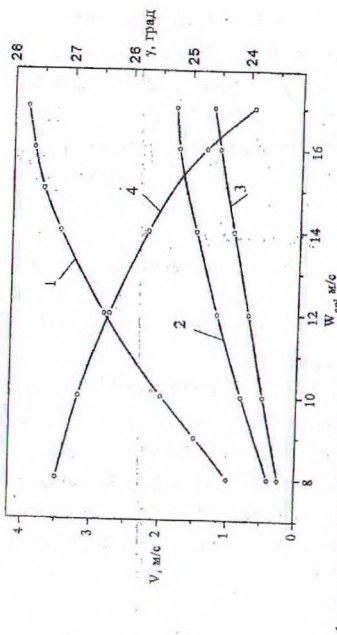


Рис. 3. Зависимость кинетических характеристик частицы в момент ее подхода к перфорированной стенке от среднерасходной скорости газового потока

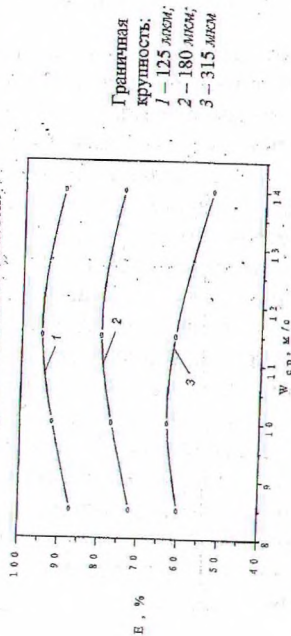


Рис. 5. Зависимость эффективности классификации от среднерасходной скорости газовой среды

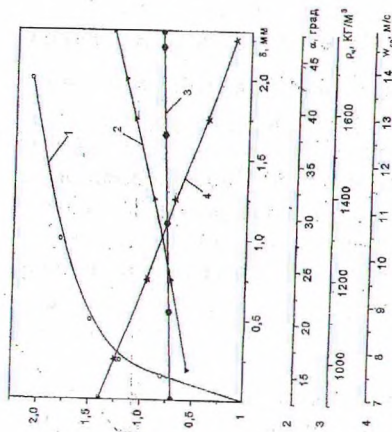


Рис. 4. Достигание частицей стенки перфорированного элемента

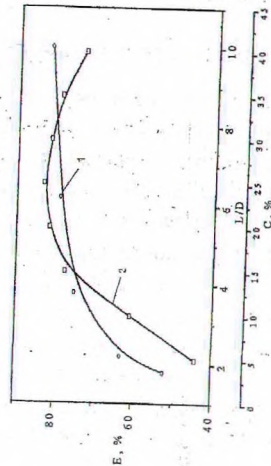


Рис. 6. Зависимость эффективности классификации

элементов с отверстиями перфорации 600 мкм находится в пределах 290÷310 мкм, а, следовательно, более крупным частицам проходить через отверстия перфорации труднее.

Результаты дальнейших исследований по влиянию длины перфорированного элемента на эффективность разделения представлены на (рис. 6) кривой 1. Из графика видно, что с увеличением длины элемента эффективность классификации возрастает, однако при увеличении длины $\frac{L}{D} > 5$ темпы роста значительно замедляются. Падение роста эффективности при $\frac{L}{D} > 5$ объясняется ослаблением крутки

газового потока, а также низким содержанием мелких частиц в смеси, что снижает вероятность их прохождения через отверстия перфорации.

Высокоэффективная классификация в газо-центробежном сепараторе будет обеспечиваться при условии равномерного отвода газового потока по всей длине перфорированного элемента. Этого можно достичь при определённой степени перфорации рабочего элемента, что и подтверждается опытами, представленными на (рис. 6) кривой 2. Из графической зависимости видно, что оптимальная доля площади отверстий элемента должна находиться в пределах 12÷24 %. Результаты влияния на эффективность других параметров обобщена в работе и представлены в виде графических зависимостей.

Проведённые исследования газо-центробежных сепараторов показывают высокую их эффективность и позволяют осуществлять их промышленное внедрение.

3.3. Исследования роторно-центробежного сепаратора.

В конструкции роторно-центробежного сепаратора, изображённого на рис. 2, полидисперсный порошок вместе с воздухом подходит к перфорированной цилиндрической обечайке в виде вихревого потока, создаваемого вращающимся диском с радиальными лопатками. Материал и воздух на диск с лопатками поступают через отверстия в крышке сепаратора. Для расчета сепаратора необходимо знать динамические характеристики сплошной и дисперсной фаз. Для определения этих параметров необходимо:

- ✧ определить траекторию частиц на подходе к диску с лопатками;
- ✧ рассмотреть движение частиц материала по диску и определить их скорость и траекторию на выходе с диска;
- ✧ рассмотреть движение частиц воздуха в зазоре между вращающимся диском с лопатками и неподвижной перфорированной обечайкой.

С точки зрения аэродинамики, роторно-центробежный сепаратор можно рассматривать как центробежный вентилятор, работающий на сильнозапыленном воздухе. Различие заключается в том, что в вентиляторе отвод воздуха осуществляется с помощью улитки, в нашем случае – равномерно через отверстия перфорированной обечайки. Поэтому параметры производительности по воздуху и развиваемому давлению рассчитывались как для вентиляторов и в дальнейшем уточнялись экспериментально.

Расчёт движения полидисперсного материала при входе в колесо вентилятора осуществлялся с помощью системы дифференциальных уравнений, в которых основными силами, действующими на частицы, были сила тяжести и сила гидродинамического воздействия воздушного потока. Расчёты показывают, что при высокой скорости вращения ротора мелкие частицы сразу попадают на лопатки и движутся по ним. Более крупные частицы при условии низкой входной скорости воздуха будут сначала попадать на вращающийся диск.

Для расчёта движения частицы материала по диску была разработана математическая модель. Основное уравнение динамики относительного движения частиц по диску в векторной форме имеет вид:

$$m\vec{a} = \vec{\Phi}_e + \vec{\Phi}_o + \vec{F}_{mp} + \vec{F}_s + \vec{F}_r \quad (11)$$

где $\vec{\Phi}_e$ — переносные силы инерции, Н; $\vec{\Phi}_o$ — кориолисовы силы инерции, Н; $\vec{F}_{mp}$ — сила трения, Н; $\vec{F}_s$ — сила лобового воздействия сплошной среды на частицу, Н; $\vec{F}_r$ — сила воздействия касательных напряжений сплошной среды на частицу, Н.

Спроецировав все силы, входящие в уравнение (11), на оси X и Y получена система дифференциальных уравнений, решением которой определяется движение частицы по поверхности диска.

Проведенные расчеты по вышеописанным уравнениям показали, что в межлопаточном пространстве частица движется в основном по поверхности лопатки. Возможны два варианта такого движения: а) движение только по поверхности лопатки; б) движение по поверхностям лопатки и диска одновременно. При движении частицы в межлопаточном пространстве на неё будут действовать центробежная сила инерции, сила трения и сила воздействия газового потока. За счёт кориолисовой силы частица будет прижиматься к лопатке, а за счёт силы тяжести — к диску, тогда сила трения в общем случае определяется по зависимости:

$$F_{mp} = f \left(mg + 2m\omega \frac{dr}{dt} \right) \quad (12)$$

Первое слагаемое в уравнении (12) описывает силу трения между частицей и диском второе — между частицей и лопаткой. Сила воздействия газового потока определяется из следующей зависимости:

$$F_{r-o} = -\frac{1}{2} k_\phi \cdot \xi \cdot \rho_z \cdot S \left| \frac{dr}{dt} - W \right| \cdot \left(\frac{dr}{dt} - W \right) \quad (13)$$

Кроме радиального стока воздуха в межлопаточном канале всегда присутствуют циркуляционные потоки, с учётом этого величина силы R и её направление воздействия могут изменяться. Так как в литературе информация отсутствует, то в работе теоретически проведён анализ различных вариантов воздействия газового потока на скорость движения частицы по лопатке. В общем виде уравнение движения частицы по лопатке имеет вид:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = m \omega^2 r - f \left(mg + 2m\omega \frac{dr}{dt} \right) \pm \frac{k_\phi \cdot \xi \cdot S \cdot \rho_z}{2} \left| \frac{dr}{dt} - W \right| \cdot \left(\frac{dr}{dt} - W \right) \quad (14)$$

Дальнейшим этапом исследований было изучение движения сорвавшихся с лопаток частиц в зазоре между ротором и перфорированной обечайкой. Частица в этом зазоре будет двигаться по инерции, но на неё будет оказывать влияние и вращающийся газовый поток. Уравнения Навье-Стокса, описывающие движение

газа с учётом оттока через перфорированную обечайку, после преобразования имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dr} = \rho_0 \left(\frac{W_\varphi^2}{r} + \frac{Q^2}{4\pi^2 r^3} \right) \\ \frac{d^2 W_\varphi}{dr^2} - \frac{1}{r} \left(\frac{Q'}{2\pi v} - 1 \right) \frac{dW_\varphi}{dr} - \frac{1}{r^2} \left(\frac{Q'}{2\pi v} + 1 \right) W_\varphi = 0 \end{cases} \quad (15)$$

Уравнения движения частицы в полярной системе координат будут иметь вид:

$$\begin{cases} m \left(\frac{dV_r}{dt} - \frac{V_\varphi^2}{r} \right) = F_r \\ m \left(\frac{dV_\varphi}{dt} + 2 \frac{V_\varphi V_r}{r} \right) = F_\varphi \end{cases} \quad (16)$$

Составленные системы уравнений описывают движение частиц от момента их попадания в корпус сепаратора до их подхода к перфорированной обечайке. На основании этих уравнений разработана программа для расчёта движения частиц в сепараторе. На рис. 7 приведены графические зависимости изменения радиальной скорости частиц. С помощью разработанной программы производится расчёт граничного размера отверстий перфорации, через которые может пройти исследуемая частица. Результаты этих расчетов представлены на рис. 8 в виде двух пучков линий. Нижние линии получены для случая, когда частица, срываясь с лопатки ротора, подходит с определенными кинематическими характеристиками непосредственно к отверстию перфорации и проходит через него. Верхний пучок линий получен для случая, когда частица с первого подхода не прошла через отверстия и, двигаясь далее под воздействием закрученного газового потока, снова подходит к перфорированной обечайке.

Результаты теоретических исследований по граничному зерну классификации, приведенные на (рис. 8), в дальнейшем проверялись экспериментально. Одновременно экспериментальными исследованиями определялась эффективность классификатора в зависимости от конструктивных и технологических параметров. Исследования проводились на роторно-центробежном классификаторе с диаметром ротора 0,4 м при различной скорости его вращения, изменении нагрузки по исходному материалу, а также изменении размера отверстий перфорированной обечайки. Классификации подвергались молотый клинкер, песок и мука грубого помола. На графике (рис. 9) приведены: кривая 4 дисперсного состава исходного продукта; кривые 1,2,3 дисперсного состава тонкого продукта, прошедшего через отверстия перфорации и кривые 1',2',3' — дисперсный состав частиц, не прошедших через отверстия.

Исследования проводились при размерах отверстий сетки перфорированного элемента 0,28 мм, для которого размер граничного зерна согласно графику (рис. 8) составляет 0,18 мм. Из графика видно, что мелкий продукт размером менее 0,1 мм практически полностью удаляется из исходного материала при любой нагрузке. Несколько хуже удаление частиц размером 0,12÷0,18 мм. Это объясняется тем,

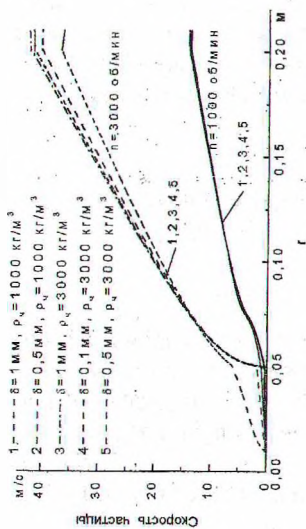


Рис. 7. Изменение радиальной скорости частицы в роторно-центробежном сепараторе

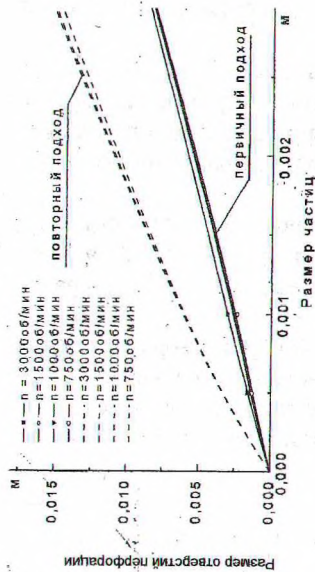


Рис. 8. Зависимость граничного размера частиц от величины отверстий перфорации

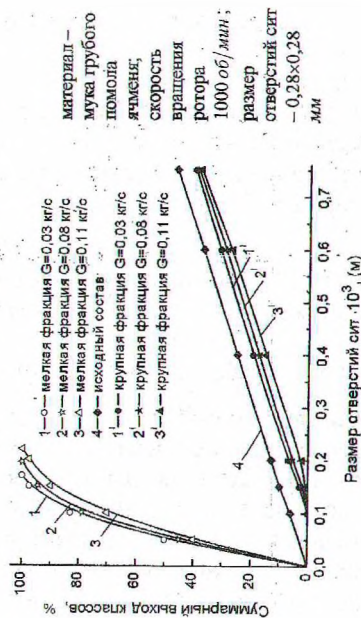


Рис. 9. Фракционный состав продуктов классификации муки в роторно-центробежном классификаторе при различной производительности

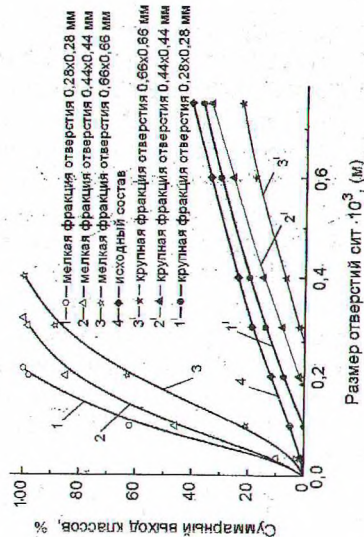


Рис. 10. Фракционный состав продуктов классификации муки в роторно-центробежном сепараторе при различном размере отверстий перфорированной обечайки (сетки)

Материал —
мука грубого
помола ячменя,
скорость
вращения
ротора —
1000 об/мин;
производитель-
ность —
0,03 кг/с

1—0—мелкая фракция отверстия 0,28×0,28 мм
2—Δ—мелкая фракция отверстия 0,44×0,44 мм
3—Δ—мелкая фракция отверстия 0,66×0,66 мм
4—●—исходный состав
1—●—крупная фракция отверстия 0,66×0,66 мм
2—Δ—крупная фракция отверстия 0,44×0,44 мм
3—Δ—крупная фракция отверстия 0,28×0,28 мм

что мелкие частицы проходят отверстия сразу после срыва с лопатки, а более крупные, не всегда точно попадающие в отверстия, вынуждены совершать вращательное движение вдоль перфорированной обечайки, а размеры граничного зерна, согласно графику (рис. 9), при таком движении уменьшаются. Однако эффективность разделения даже при больших нагрузках остаётся высокой и составляет $85 \div 90$ %.

На рис. 10 приведён фракционный состав продуктов классификации в роторно-центробежном классификаторе при различном размере отверстий перфорированной обечайки (сетки). Анализируя граничный размер разделения при различных отверстиях перфорированной обечайки, можно сделать вывод, что этот показатель хорошо согласуется с теоретическими расчётами.

Экспериментальные исследования при изменении числа оборотов ротора в пределах от 750 до 1500 об/мин показывают, что скорость вращения ротора практически не оказывает влияния на размер граничного зерна разделения, что ранее подтверждалось теоретическими расчётами.

Таким образом, анализ состава порошка, прошедшего через отверстия перфорации, показывает, что размер частиц определяется прежде всего размером отверстий перфорированной обечайки. Обработка экспериментальных данных позволила получить математическую зависимость для описания гранулометрического состава порошка, проходящего через перфорированную обечайку в зависимости от размера её отверстий:

$$D = 100 \left[1 - e^{-\left(11,4d^{-2,3}\right)\delta^{2,5}} \right] \quad (17)$$

где D – суммарный выход классов “по минусу”; d – размер отверстий перфорации; δ – размер частиц.

Результаты исследований роторно-центробежных сепараторов показывают, что они обеспечивают высокую эффективность классификации и в сравнении с вибрационными ситовыми грохотами позволяют более полно извлекать мелкую фракцию из исходного продукта, а производительность, отнесённая к единице ситовой поверхности, в 3 раза выше.

4. Разработка и исследование ударно-центробежных мельниц с непрерывной проточной классификацией продуктов помола

4.1. Разработка ударно-центробежных мельниц

Выводы, сделанные в первой главе, а также результаты исследований проточных классификаторов позволили перейти к созданию принципиально новых конструкций ударно-центробежных мельниц с непрерывной проточной классификацией. Основным достоинством разработанных конструкций мельниц является то, что высокоскоростному ударно-импульсному нагружению частицы подвергаются поштучно, и после измельчения готовый продукт не задерживается в рабочей зоне, а сразу проходит классификацию и удаляется из агрегата.

Из разработанных на уровне изобретений более десятка конструкций ударно-центробежных мельниц с проточной классификацией три представлены на рис. 11. Основным рабочим узлом этих конструкций является вращающийся ротор, состоящий из диска и закрепленных на нем лопаток. По кольцу на небольшом расстоянии от наружных концов лопаток в корпусе установлены отражательные стержни.

В первой конструкции (вариант а) корпус мельницы выполнен в виде улитки, а отражательные стержни имеют прямоугольное сечение и установлены с определенным зазором между собой. При работе мельницы частицы исходного материала через питающий патрубок подаются во вращающийся ротор, попадают на лопатки, где за счет центробежной силы разгоняются и, сорвавшись с них, с высокой скоростью ударяются об отражательные стержни, за счет чего происходит их измельчение. Мелкие частицы измельченного материала подхватываются вращающимся потоком воздуха, а крупные отскакивают от стержней, попадают под удар лопаток и снова ударяются об отражательные стержни. Вращающийся поток воздуха с мелкими частицами за счет избыточного давления проходит через зазоры между стержнями и далее, двигаясь по расширяющемуся каналу, проходит тангенциальный патрубок и поступает в циклон для отделения твердой фазы от воздуха. Так как аэрозольный поток подходит к щелям между стержнями под углом, то через них могут пройти только те частицы, размер которых значительно меньше ширины щелей.

Во второй конструкции мельницы (вариант б) отражательные стержни имеют круглое сечение и установлены вплотную друг к другу. Для отвода вместе с воздухом продуктов измельчения в крышке у стенки мельницы имеется полукольцевой канал, над которым сверху закреплен тангенциальный патрубок. Для проточной классификации продуктов помола снизу крышки, на входе в полукольцевой канал, на определенном расстоянии друг от друга по радиусу установлены отбойные пластины, имеющие наклон по ходу вращения ротора. Процесс измельчения в данной мельнице аналогичен предыдущей, только продукты помола вместе с вращающимся воздушным потоком поднимаются вверх и подходят под углом к пластинам классификатора. Крупные частицы, двигаясь по инерции, ударяются об отбойные пластины и, отскакивая вниз, снова попадают в зону помола, а мелкие — вместе с воздухом огибают пластины классификатора и поступают в спиралеобразный патрубок и далее в циклон на разделение.

Третья конструкция мельницы (вариант в) является двухступенчатой, однако для создания мягких условий избирательного измельчения может иметь три, четыре и более ступеней. Процесс измельчения на первой ступени аналогичен как и в мельнице варианта (а), только готовый продукт, прошедший через щели между отражательными стержнями, по кольцевому каналу опускается вниз, а крупные, (недоизмельченные) частицы из камеры помола по конусу поступают в центральную часть ротора второй ступени. На второй ступени происходит окончательный домол материала и готовый продукт вместе с воздухом через полукольцевой зазор и спиралеобразный патрубок днища мельницы удаляются в циклон на разделение.

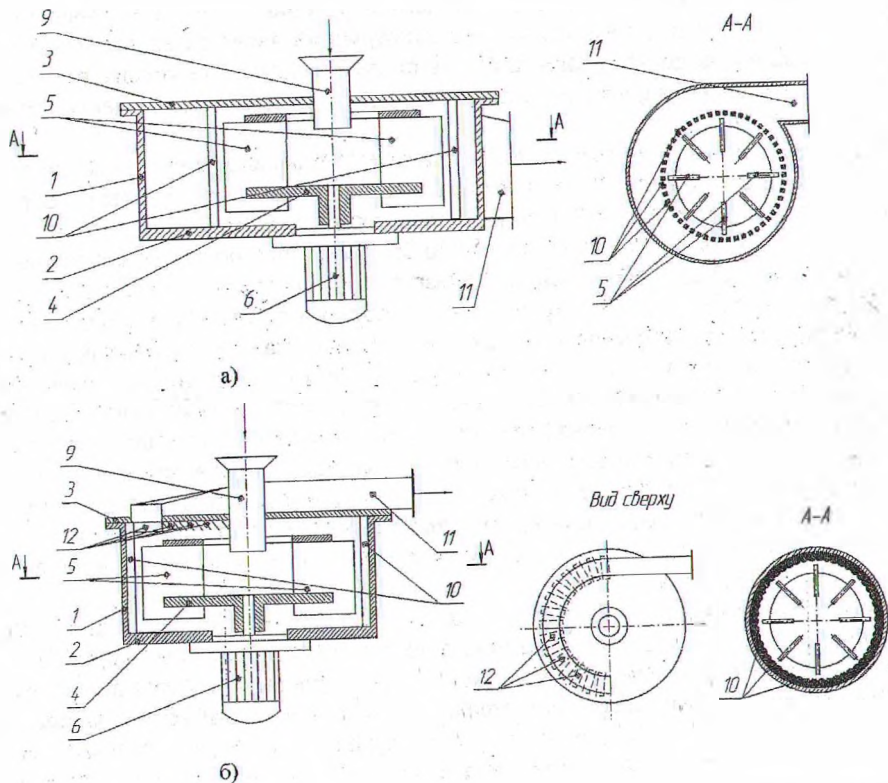


Рис. 11. Ударно-центробежные мельницы с проточными классификаторами

а) с тангенциальной выгрузкой измельченного материала,

б) с верхней выгрузкой измельченного материала,

в) двухступенчатая с нижней выгрузкой измельченного материала.

1-корпус; 2- днище; 3-крышка; 4- диск; 5-лопатки; 6-электродвигатель; 7-вал; 8-клиноременная передача; 9-питательный патрубок; 10-отражательные стержни; 11-разгрузочный патрубок; 12-отбойные пластины; 13-конус.

4.2. Теоретические и экспериментальные исследования ударно-центробежных мельниц

Анализ теоретических работ по ударному разрушению показывает, что из физико-механических свойств на дисперсный состав продуктов измельчения основное влияние оказывают допустимые напряжения на растяжение, модуль упругости и плотность материала. Однако непостоянство значений этих величин не позволяет учитывать их при расчете качества помола. Дисперсный состав продуктов измельчения также будет зависеть от формы исходных кусков материала, скорости их удара, нагрузки на измельчитель по материалу, геометрических параметров рабочих узлов мельницы и т. д. Таким образом, теоретическими исследованиями получить зависимости для расчета ударно-центробежных мельниц практически невозможно, на что неоднократно указывали ведущие специалисты в области дезинтеграционных процессов.

Следовательно, конкретные зависимости для определения дисперсного состава продуктов измельчения, затрачиваемой мощности и производительности ударно-центробежных мельниц определялись на основе экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования проводились на полупромышленных установках с диаметром ротора по концам лопаток 0,4 м. Так как измельчающая часть всех разработанных мельниц практически одинаковая, то на первой стадии исследований изучался процесс ударного измельчения при однократном прохождении материала через мельницу без классификатора. Опытная мельница имела цилиндрический корпус, который внутри был футерован отражательными стержнями. Ротор мельницы приводился во вращения от электродвигателя, установленного на крышке. В нижней части вместо днища крепился конический бункер, куда поступали продукты помола.

При исследовании изучалось качество помола материала с различными прочностными характеристиками (мел, известь, гипсовый камень, сульфат аммония, аммофос, сильвинит, зерно ячменя и пшеницы). При этом изменялась производительность и угловая скорость вращения ротора. При исследованиях постоянно измерялась мощность, затрачиваемая на привод. На установке также производились экспериментальные исследования по влиянию на качество помола геометрических параметров мельницы.

Оценку качества помола наиболее достоверно можно получить при наличии графической зависимости распределения всей массы продуктов помола по размерам. При обработке опытных данных функция распределения строилась на основе ситового анализа и выражалась в процентном отношении массы всех частиц, диаметр которых меньше отверстий данного сита, к общей массе анализируемого материала $D_{(0)}$.

Результаты экспериментальных исследований гранулометрического состава продуктов помола всех исследуемых материалов приведены на графике рис. 12. Из графика видно, что мел и известь измельчаются наиболее тонко, что объясняется слабой связью между отдельными кристалликами, из которых они состоят. Значительно хуже измельчаются зерно ячменя, что объясняется тем, что оно оку-

тано несколькими слоями прочной и эластичной оболочки. Влияние нагрузки по материалу при измельчении гипсового камня представлено на графике рис. 13, из которого видно, что с возрастанием нагрузки качество помола ухудшается. Особо сильное влияние на качество измельчения оказывает скорость вращения ротора т. е. скорость удара, что видно из графика 14. Влияние геометрических параметров на эффективность измельчения определялось как экспериментальными исследованиями, так и по результатам промышленных внедрений.

Исследованиями установлено, что использование в мельницах стержней круглого или прямоугольного сечений заметных влияний на качество измельчения не оказывает.

Изменение числа лопаток ротора от 4 до 8 улучшает качество помола, однако дальнейшее увеличение к существенным результатам не приводит.

Оптимальная высота лопаток ротора на основании исследований должна приниматься из следующей зависимости:

$$h_n = 0,2 \cdot D_2 \quad (17)$$

С уменьшением зазора между отражательными стержнями и наружной кромкой лопаток качество измельчения улучшается, однако затрачиваемая мощность на привод ротора возрастает. Для малых мельниц с диаметром ротора D_2 менее 0,5 м зазор следует принимать равным 5–8 мм, для наиболее крупных – до 15 мм.

Исследования влияния размера кусков исходного материала проводились при измельчении материала различной прочности (мел, гипсовый камень). Опыты показали, что для материалов, имеющих низкую прочность (мел), увеличение размера кусков до 20 мм особого влияния на качество измельчения не оказывает, а для гипсового камня с увеличением размеров выше 8 мм качество помола начинает ухудшаться.

Достаточно точное математическое описание дисперсного состава продуктов помола, согласно заключений известных исследователей, можно получить, используя уравнение Розена-Рамлера. Однако желая в математической зависимости учесть влияние физико-механических свойств материала, скорости вращения ротора и нагрузки по материалу, формулу Розена-Рамлера пришлось усовершенствовать, вводя в показатель степени величину δ_{50} . Эта величина является медианой распределения массы частиц, т. е. размер частиц, при котором масса всех частиц мельче или крупнее его составляет 50%.

С учетом величины δ_{50} формула Розена-Рамлера имеет вид:

$$D_{(\delta)} = 100 \cdot \left[1 - e^{-b \left(\frac{\delta}{\delta_{50}} \right)^n} \right] \quad (18)$$

Обработка опытных данных позволила найти значение эмпирических постоянных $b = 0,68$; $n = 0,75$.

Эмпирическое уравнение для определения медианы распределения массы частиц имеет следующий вид:

$$\delta_{50} = 2,71 C W_r^{-1,42} G \quad (19)$$

где W_r – тангенциальная скорость ротора по концам лопаток, м/с; G – производительность мельницы, кг/с; C – коэффициент прочности, учитывающий физи-

ко-механические свойства материала. Значения этого коэффициента для всех исследованных материалов приведены на графике рис. 12.

Обработка опытных данных позволила установить, что критическая скорость начала разрушения тесно связана с коэффициентом C и определяется для каждого материала следующей зависимостью:

$$V_{кр} = 224 \cdot C \quad (20)$$

Все теоретические исследования по созданию математических зависимостей для определения мощности, затрачиваемой на измельчение материала, оказались безрезультатными, так как этот процесс является чрезвычайно сложным. Поэтому в настоящее время расчет мощности проводится по эмпирическим зависимостям, полученным, на основании экспериментальных исследований для строго определенной конструкции при измельчении определенного материала. Для определения мощности, затрачиваемой на измельчение в ударно-центробежных мельницах, нами принят несколько другой подход. Сначала рассматривались все статьи расхода энергии, затрачиваемой при ударно-центробежном измельчении, определялись зависимости для расчетов величины этих статей и далее теоретические расчеты дополнялись при необходимости экспериментальными исследованиями.

При работе на холостом ходу ударно-центробежную мельницу необходимо рассматривать как вентилятор. Согласно проведенных исследований и данных, имеющихся в литературе, КПД такого вентилятора $\eta_e = 0,5$. Расход воздуха и развиваемый напор рассчитываются через коэффициент производительности $\varphi = 0,07$ и коэффициент развиваемого напора $\phi = 0,6$. Подробный расчет изложен в главе 3. В конечном итоге мощность, затрачиваемая на работу мельницы как вентилятора, определится известной зависимостью:

$$N_e = \frac{Q \cdot H}{\eta_e} \quad (21)$$

При движении частиц по лопаткам или одновременно по лопаткам и диску энергия будет затрачиваться на трение:

$$N_{тр} = I_{л\text{оп}} \cdot f \cdot \left(G \cdot g + 2 \cdot G \cdot \omega \cdot \frac{V_{\max}}{2} \right) \quad (22)$$

где ω — угловая скорость вращения ротора, рад/с; $V_{\max}$ — максимальная радиальная скорость частиц на сходе с кромок лопаток, м/с.

Мощность также будет затрачиваться на придание частицам кинетической энергии при сходе с лопаток. Часть наиболее прочных частиц, недостаточно измельчившись, будет отскакивать от отражательных стержней и снова попадать под удар лопаток, и далее разогнавшись, снова ударяться о стержни. Следовательно, это явление необходимо учесть коэффициентом, учитывающим прочность материала C , который определен ранее, и поправочным коэффициентом K .

Тогда зависимость затрачиваемой мощности на придание кинетической энергии частицам запишется:

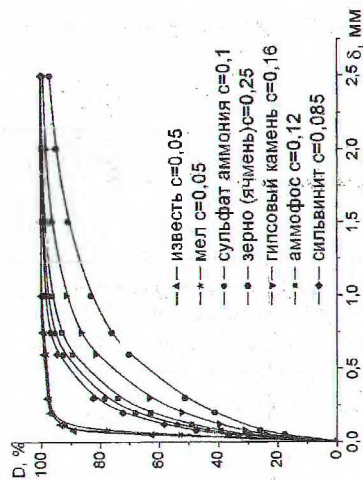


Рис. 12. Фракционный состав продуктов ударно-центрального измельчения материалов с различными прочностными характеристиками $G=460-520 \text{ кг/ч}$, $n=2900 \text{ об/мин}$

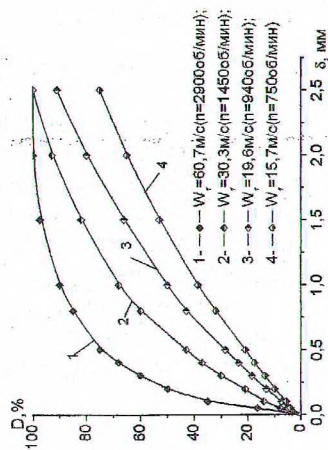


Рис. 14. Фракционный состав продуктов ударно-центрального измельчения гипсового камня при различных оборотах ротора $G=480 \text{ кг/ч}$

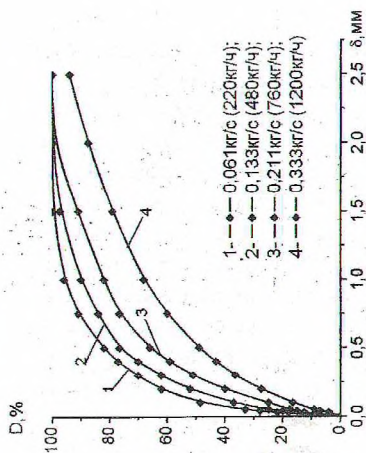


Рис. 13. Фракционный состав продуктов ударно-центрального измельчения гипсового камня при различной производительности $n=2900 \text{ об/мин}$

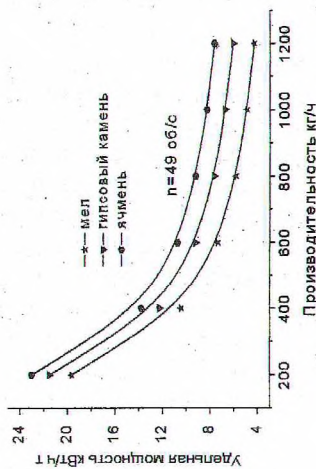


Рис. 15. Зависимость удельного расхода энергии на измельчение 1 тонны материала от производительности

$$N_{\text{кш}} = K \cdot C \cdot \frac{G \cdot V_{\text{пол}}}{2} \quad (23)$$

С учетом всех статей затрат зависимость для расчета мощности запишется:

$$N_{\text{пол}} = \frac{\frac{Q \cdot H}{\eta_s} + I_{\text{пол}} \cdot f \cdot (G \cdot g + 2 \cdot G \cdot \omega \cdot V_{\text{max}}) + K \cdot C \cdot \frac{G \cdot V_{\text{пол}}}{2}}{\eta_{\text{прив}}} \quad (24)$$

Обработка экспериментальных данных позволила найти значение поправочно-го коэффициента $K = 18,33$.

Проверка расчетных данных по формуле (24) с многочисленными экспериментальными данными показывает хорошую сходимость, расхождение не превышает 12%.

Одним из основных показателей энергопотребления мельницы является удельный расход энергии на измельчение 1 тонны материала. На рис. 15 приведены графические зависимости удельного расхода энергии при различной производительности. Из графика видно, что при измельчении зерна ячменя мельница потребляет 8 кВт·ч на одну тонну, что на 15+20 % ниже, чем у молотковой мельницы. Однако сравнения по качеству помола более ощутимы. Если в ударно-центробежной мельнице среднемедианный размер частиц ячменя по массе составляет $\delta_{30} = 0,5 \div 0,7 \text{ мм}$, то в молотковых измельчителях он равен $\delta_{30} = 1,2 \div 1,6 \text{ мм}$. Аналогичная картина наблюдается при измельчении и других материалов.

После изучения эффективности измельчения и энергопотребления при помоле материалов в ударно-центробежных мельницах дальнейшие исследования проводились на конкретных конструкциях мельниц с проточными классификаторами с целью определения качества готового продукта с учетом его классификации и определения допустимых нагрузок.

Сначала такие исследования были проведены на конструкции ударно-центробежной мельницы (рис. 11, а), где классификация осуществляется за счет установки отражательных стержней с зазором друг относительно друга. Исследования проводились при измельчении гипсового камня при установке отражательных стержней с зазором 1 мм, 2 мм и 3 мм. Кривая 1 (рис. 16) описывает дисперсный состав продуктов помола без классификатора, а кривые 2, 3, 4 построены для дисперсного состава продуктов помола с классификацией при зазоре между стержнями 1, 2, 3 мм соответственно. Дисперсный состав продуктов измельчения, прошедших в зазоры, можно с достаточной точностью (отклонение не более 10%) описывать зависимостью, полученной в главе 3 при исследовании роторно-центробежных классификаторов.

В ходе исследований установлено, что мельницы с проточными классификаторами имеют ограничения по производительности. Эти ограничения проявляются в том, что при нагрузке выше допустимой материал не успевает проходить в зазоры между отражательными стержнями – рис. 11 (а) или в зазоры между наклонными пластинами рис. 11 (б), накапливается в рабочей камере, что ведет к резкому возрастанию потребляемой мощности мельницы. Диапазон устойчивой работы

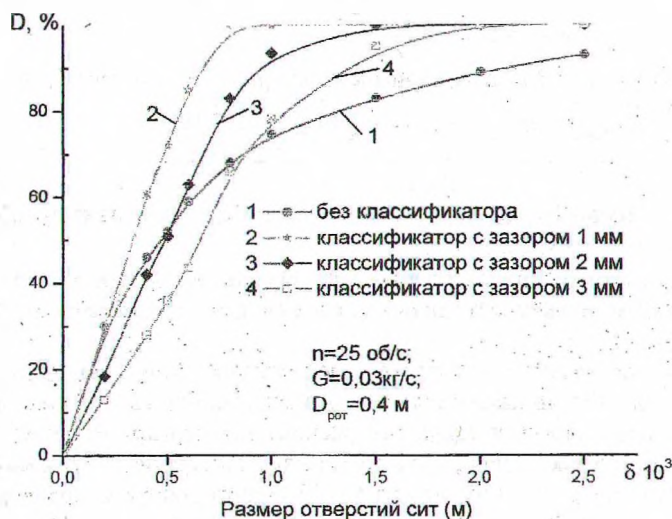


Рис. 16. Фракционный состав продуктов помола гипсового камня в ударно-центробежных мельницах

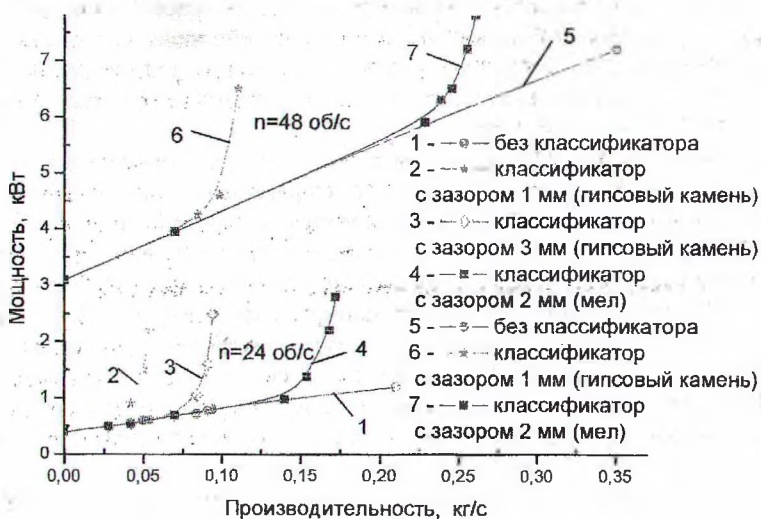


Рис. 17. Зависимость потребляемой мощности ударно-центробежной мельницей от нагрузки по материалу

мельниц в зависимости от числа оборотов ротора, величины зазора и вида измельчаемого материала хорошо виден из графика рис. 17, построенного для мельницы – рис. 11 (а). На графике нанесены линии 1 и 5 энергопотребления в зависимости от производительности при работе без классификатора при числе оборотов ротора $n = 94$ об/с и 48 об/с соответственно. Для мельниц с классификатором, когда нагрузка не превышает допустимую, расход энергии такой же, как и для мельниц без классификатора. При нагрузке по материалу сверх допустимой наблюдается резкое возрастание потребления электроэнергии.

По результатам исследований установлено, что рабочая нагрузка на мельницу по материалу снижается с уменьшением скорости вращения ротора, уменьшением величины зазоров и увеличением прочности материала. Обработка опытных данных позволила получить зависимость для расчета допустимой нагрузки по материалу для мельниц с проточным классификатором:

$$G = K \cdot \frac{D_2^{1,3} \cdot h_x^{1,2} \cdot n \cdot b^{0,5}}{C^{0,3}}, \text{ кг/с} \quad (25)$$

где D_2 – диаметр ротора по концам лопаток, м; h_x – высота лопаток ротора, м; n – число оборотов ротора, об/с; b – величина зазора между стержнями для мельницы рис. 11 (а), или расстояние между пластинами классификатора для мельницы рис. 11 (б), м; C – коэффициент, учитывающий прочностные свойства материала; K – коэффициент для мельницы рис. 11 (а) $K=1,8$, для мельницы рис. 11 (б) $K=1,43$.

Оптимальное значение величины b для мельниц рис. 11 (а) следует принимать в пределах $b=0,001 \div 0,004$ м, а для мельниц рис. 11 (б) при оптимальном угле наклона пластин $\alpha=45 \div 55$ град. $b=0,005 \div 0,015$ м.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили сделать более глубокий анализ механизма ударного разрушения, дисперсного состава продуктов измельчения, траектории движения частиц, образующихся после удара, а также статей затрат мощности. Это позволило наметить пути дальнейшего развития техники ударно-центробежного разрушения материалов с целью значительного снижения энергозатрат на осуществление этого процесса. Предварительные экспериментальные исследования подтверждают правильность намеченных путей, и в ходе дальнейших исследований можно достичь снижения энергозатрат при ударно-центробежном измельчении материалов более чем в 2 раза в сравнении с существующими конструкциями с получением более однородного состава готового продукта.

4.3. Исследование избирательного измельчения силвинитовой руды на многоступенчатой мельнице с промежуточной классификацией

Силвинитовая руда являющаяся основным сырьем при производстве калийных удобрений, состоит из трех основных компонентов: хлористого калия, хлористого натрия и галопелита. Полезным извлекаемым компонентом является хлористый калий, а два других путем флотации отделяются и направляются в отвал. Для разделения компонентов флотационным способом необходимо произвести измельчение силвинитовой руды до размеров частиц менее 3 мм, в этом случае

кристаллы хлористого калия будут раскрыты. Галопелит, содержащий в своем составе различные сочетания глинистых минералов, в сухой руде является трудно-измельчимым компонентом, $NaCl$ и KCl — легкоизмельчимыми.

В настоящее время измельчение руды на обогатительных фабриках производят в барабанных стержневых мельницах мокрым способом. Галопелит при мокром способе измельчения руды набухает и при механическом воздействии на него диспергирует во фракции менее 0,07 мм. При флотации наличие в суспензии мельчайших частиц галопелита отрицательно сказывается на процесс извлечения KCl . Следовательно, прежде чем подать руду на мокрое измельчение и далее на флотацию, желательно удалить из нее как можно больше галопелита. Исследования с этой целью проводились другими исследователями с использованием молотковой дробилки с классификатором и получены положительные результаты.

Разработанная нами многоступенчатая ударно-центробежная мельница предназначена для избирательного измельчения и поэтому аналогичные исследования проведены и нами. Исследования проводились на четырехступенчатой мельнице с диаметром роторов 0,4 м при непрерывном отводе на каждой ступени мелкоизмельченного продукта, а крупнодисперсные частицы подавались в ротор ниже-расположенной ступени, а с последней ступени неизмельченный продукт отводился как трудноизмельчаемый и далее производился его анализ на содержание галопелита. Содержание галопелита определялось и в мелкоизмельченной фракции, удаляемой с каждой ступени. Полученные опытные данные по изменению содержания галопелита в руде после каждой ступени обрабатывались в виде графических зависимостей.

Проанализировав результаты всех опытов, сделаны следующие выводы:

использование многоступенчатой ударно-центробежной мельницы избирательного измельчения может обеспечить более высокую степень извлечения галопелита из руды чем с применением молотковой мельницы, при этом: частота вращения ротора должна быть такой, чтобы тангенциальная скорость по концам лопаток находилась в пределах 20 — 30 м/с; размер щелей между отражательными стержнями должен составлять 3,5 мм; оптимальная нагрузка по сильвиниту, отнесенная к 1 м² суммарной поверхности отражательных стержней 4^й ступеней, должна быть 9500 кг/ч; При этих параметрах с 5 % сильвинита в отвал будет направляться 60 — 65% галопелита, что значительно интенсифицирует процесс флотации, который является определяющим при производстве калийных удобрений данным способом. Для доведения результатов исследований до производственной реализации необходимо проведение полупромышленных испытаний.

5. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования ударно-центробежных мельниц и проточных классификаторов проводились на полупромышленных установках, что позволило сразу перейти к их промышленному внедрению. Так как требования к промышленным мельницам весьма различаются как по производительности, так и по качеству помола, форме и особенностям исходного сырья, способу измельчения, взрывоопасности про-

дуктов помола и т. д., то естественно требовалось вносить конструктивные изменения как в ударно-центробежные мельницы, так и в проточные классификаторы. Этим и объясняется большое разнообразие разработанных конструкций мельниц и классификаторов.

В настоящее время внедрено в производство более ста ударно-центробежных мельниц со встроенными проточными классификаторами.

Три ударно-центробежных мельницы внедрены на ОАО «Белмедпрепараты». Две мельницы, используемые для тонкого помола минерального и растительного сырья, обеспечивают производительность до 400 кг/ч, тонина продуктов помола менее 100 мкм. Третья мельница используется для мокрого помола суспензии кукурузная мука – вода. Внедрение данной мельницы позволило сократить продолжительность процесса биосинтеза ферментов и удельные расходы сырья на производство ферментных препаратов. В НПП «Агрономия» внедрена ударно-центробежная мельница для помола антикоррозионного фосфатного пигмента. При производительности 150 кг/ч мельница обеспечивает тонину помола с остатком на сите №0063 не выше 0,5–1%.

Ударно-центробежная мельница со встроенным классификатором внедрена на ОАО «Белтипс» при помоле гипса, используемого для приготовления сухих смесей. Мельница обеспечивает производительность 1 т/ч и качество помола определяется остатком 2% на сите 200 мкм, что намного превосходит предъявляемые требования.

Ударно-центробежная мельница производительностью 5 т/ч внедрена для тонкого помола минеральных удобрений на установке приготовления комбинированных высококонцентрированных суспензированных удобрений на ОАО «Крупская сельхозхимия». Мельница обеспечивает измельчение гранул и кристаллов до размера частиц менее 150 мкм.

В производстве безхлорных комбинированных удобрений (ООО «Гринтур», г. Гомель) ударно-центробежная мельница производительностью 2 т/ч используется для измельчения кристаллов сульфата аммония и обеспечивает требуемое качество помола.

Высокое качество помола достигается при измельчении в ударно-центробежной мельнице кусков дубового дубильного экстракта на Речицком опытно-промышленном гидролизном заводе. Здесь тонина помола составляет менее 100 мкм при производительности мельницы 500 кг/ч.

Ударно-центробежные мельницы с проточными классификаторами внедрены для помола пищевых добавок в УП «Унитехпром БГУ», и для приготовления сверхтонких суспензий замедлителей горения в Институте физико-химических проблем БГУ, для измельчения отходов из композиционных материалов на Осиповичском заводе автомобильных агрегатов.

Внедрение ударно-центробежных мельниц продолжается и на других предприятиях, но наиболее широкое применение они нашли в сельском хозяйстве для измельчения зерна и других компонентов (шрот, соль, мел) как при производстве комбикормов, так и просто для производства тонкоизмельченной фуражной муки. Применяемые для этих целей молотковые дробилки обеспечивают грубый помол фуражного зерна, что приводит к низкой его усвояемости животными. Для этих

целей только ООО «Технолог» изготовило и поставило сельскохозяйственным предприятиям 64 мельницы, кроме того значительное количество изготовлено НПП «Агромел». В настоящее время НПП «Агромел» произведена унификация мельниц и налажен выпуск трех типов производительностью 500, 1400 и 2000 кг/ч. Для обеспечения качественного помола последние две мельницы выполняются двухступенчатыми.

Многоступенчатые мельницы избирательного измельчения нашли широкое применение для шелушения зерна с целью получения крупы. Шелушение также является избирательным процессом, заключающимся в удалении с зерна верхних слоев при сохранении целым ядра. Использование в мельнице проточного классификатора позволяет непрерывно удалять из рабочей зоны продукты шелушения, что в несколько раз интенсифицирует процесс получения крупы. Разработанная машина избирательного измельчения с непрерывной проточной классификацией позволяет осуществлять весь процесс получения крупы в одном агрегате вместо девяти по старой технологии. При этом расход электроэнергии на 1 т. перерабатываемого ячменя снижается с 120 кВт·ч до 35 кВт·ч. Металлоемкость и стоимость установки снижается в 25 раз. В настоящее время для нужд республики произведено 120 таких агрегатов.

Проточные классификаторы установлены во всех внедренных ударно-центробежных мельницах, кроме того, широко используются как самостоятельные агрегаты. Например, в сельскохозяйственном производстве для первичной очистки зерна. Зерноочистительная техника в республике не производится, а старая из-за длительной эксплуатации практически вышла из строя. Разработанный нами сепаратор первичной очистки зерна, состоящий из узла проточного сепарирования крупных примесей и узла гравитационно-каскадного отделения мелких примесей, имеет стоимость в 2,5 раза ниже российских аналогов, а качество очистки зерна от примесей в 2 раза выше. Стоимость сепаратора немецкой фирмы «Петкус» выше в 12 раз. Использование сепаратора первичной очистки позволяет снизить на 20-30 % расход топлива на сушку зерна, что позволяет одним агрегатом за сезон сэкономить 8 тонн топлива.

В настоящее время в сельхозпредприятия республики внедрено 15 сепараторов первичной очистки и 3 сепаратора окончательной очистки зерна.

Потребность сельскохозяйственных предприятий в ударно-центробежных мельницах составляет более тысячи штук и поэтому на НПП «Агромел» организовано их серийное производство.

Даже те относительно небольшие объемы внедрения мельниц, шелушительных аппаратов и сепараторов позволили получить экономический эффект 2 272 миллиона рублей. Полное обеспечение сельскохозяйственных предприятий мельницами тонкого помола фуражного зерна и высокоэффективной зерноочистительной техникой позволит решить две весьма важные в сельскохозяйственном производстве проблемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ причин высокого энергопотребления и очень низкого КПД промышленных мельниц позволил определить основные направления создания мельничных агрегатов более высокой эффективности при низком энергопотреблении. В новых конструкциях мельниц необходимо стремиться осуществлять измельчение за счёт ударно-импульсного поштучного нагружения частиц при непрерывном удалении продуктов измельчения из рабочей зоны с последующей их высокоэффективной классификацией с целью направления недоизмельчённых частиц на домол [8].

Анализ способов и конструкций классификаторов промышленных мельниц показал низкую их эффективность, что ведёт к перегрузке мельниц тонкоизмельчённым материалом и тем самым к снижению их производительности и значительным энергозатратам на неоправданное переизмельчение готового продукта [1, 2, 5, 9, 47].

2. Теоретическими и экспериментальными исследованиями доказана возможность достижения высокой эффективности классификации путём использования проточных течений двухфазных потоков с отводом мелкой твёрдой фракции с частью газового или жидкостного потока [1, 13, 21, 22, 31, 39, 45].

3. Разработана на уровне изобретений группа проточных классификаторов, которые могут работать как самостоятельные аппараты для разделения на фракции сухих порошков или суспензий или использоваться в мельничных агрегатах, работающих по замкнутому циклу [17, 19, 43, 53, 54].

4. На основе теоретического анализа и экспериментальных исследований процесса проточной классификации в газоцентробежном сепараторе разработана инженерная методика расчёта граничного зерна разделения. Экспериментальными исследованиями определено влияние конструктивных и технологических параметров на эффективность процесса классификации и сделаны рекомендации для проектирования промышленных сепараторов [19, 21, 22].

В результате теоретических исследований процесса классификации в проточном роторно-центробежном классификаторе произведено математическое описание движения частиц материала на всех участках пути от загрузочной воронки до разделения на перфорированной обечайке. Разработана математическая программа расчёта на ЭВМ процесса разделения материала на фракции в роторно-центробежном классификаторе. Теоретически изучено влияние радиального и циркуляционного потоков воздуха в межлопаточном пространстве ротора на движение частиц по лопаткам. Проведены экспериментальные исследования классификации порошков различных материалов при изменении в широком диапазоне конструктивных и технологических параметров роторно-центробежного сепаратора. В ходе экспериментальных исследований установлено, что при классификации полидисперсных порошков в роторно-центробежном сепараторе достигается практически полное извлечение из исходной смеси мелкой фракции до заданного граничного размера, при этом производительность, отнесённая к единице перфорированной поверхности, в три раза выше, чем в механических ситовых грохотах [17, 20, 24, 49].

5. На уровне изобретений разработано десять ударно-центробежных мельниц со встроенными проточными классификаторами, позволяющих производить измельчение материала с одновременной классификацией и получать продукт требуемого дисперсного состава. Очень важной положительной особенностью новых конструкций мельниц является то, что процесс измельчения осуществляется ударно-импульсной нагрузкой поштучно для каждой частицы исходного материала. Разработанные мельницы могут использоваться для сухого, мокрого и избирательного измельчения материалов [57-66].
6. Аналитическими исследованиями установлены основные факторы, влияющие на эффективность процесса измельчения в новых конструкциях мельниц, которые были в дальнейшем подтверждены экспериментальными исследованиями.
 На полупромышленной установке проведены исследования эффективности работы новых конструкций мельниц при измельчении различных материалов, отличающихся физико-механическими свойствами, при изменении в широком диапазоне скорости ударного нагружения, производительности и геометрических параметров рабочих органов [7, 9, 24, 47].
 На основе теоретических и экспериментальных исследований определены оптимальные геометрические параметры ударно-центробежных мельниц и получена математическая зависимость, описывающая дисперсный состав продуктов помола при ударно-центробежном измельчении в зависимости от физико-механических свойств материала, скорости вращения ротора и нагрузки по исходному материалу, а также полуэмпирическая зависимость для расчёта мощности привода мельниц. Экспериментальными исследованиями получены математические зависимости для расчёта производительности и дисперсного состава продуктов измельчения в ударно-центробежных мельницах с различными конструкциями проточных классификаторов [3, 9, 18, 23, 24, 25].
7. Проведен глубокий анализ путей дальнейшего снижения энергоёмкости ударно-центробежных мельниц. На этой основе начали создаваться мельницы нового поколения, отличающиеся более низкой энергоёмкостью, большей однородностью продуктов измельчения, которые при этом в конструктивном отношении просты и надёжны.
8. Изложены результаты исследований по избирательному измельчению силвинита в многоступенчатой ударно-центробежной мельнице. Исследования показывают, что при многоступенчатом измельчении и непрерывном удалении требуемой фракции готового продукта можно создать оптимальные условия, при которых менее прочные фракции (KCl, NaCl) будут измельчаться, а более прочный компонент (галопелит), оставаясь менее измельчённым, будет удаляться из руды. Снижение содержания галопелита в руде позволит интенсифицировать процесс флотации, который является одним из основных при производстве калийных удобрений флотационным способом [4, 6].
9. Промышленные испытания и внедрения ударно-центробежных мельниц с проточными классификаторами показывают их высокую эффективность и широкую область применения для помола материала самых различных свойств сухим и мокрым способом, в том числе и для избирательного измельчения. Показатели по качеству измельчения и удельному расходу электроэнергии ударно-

центробежных мельниц значительно лучше, чем у молотковых и других серийных конструкций мельниц, а стоимость изготовления и металлоёмкость во всех случаях более чем в 2 раза ниже [9, 11, 14, 15, 16, 30].

10. Проточные сепараторы и ударно-центробежные мельницы находят дальнейшее применение в химической промышленности, в производстве строительных материалов и других отраслях. С помощью изложенных выше разработок началось перевооружение зерноочистительных и помольных участков сельскохозяйственных предприятий. Даже те небольшие объёмы внедрения, которые осуществлены до 1.1.2004 года, (64 мельницы, 76 шелушильных машин и 15 зерноочистительных сепараторов) позволили получить эффект 2.272 миллионов рублей. Потребность сельскохозяйственных предприятий в зерноочистительных сепараторах и мельницах исчисляется 1÷2 тысячами и поэтому НПП «Агромел» организовало серийное их производство. Согласно расчётам, проведённым Минским областным управлением по надзору за рациональным использованием топливно-энергетических ресурсов, оснащение зернотоков сельскохозяйственных предприятий позволит экономить в год 2 тысячи тонн печного топлива.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Левданский А. Э., Левданский Э. И. Высокоэффективные проточные процессы и аппараты. – Минск: БГТУ, 2001, – 236 с. (**Монография**)
2. Левданский Э. И., Левданский А. Э. Энергосбережение при измельчении материалов. – Минск: БГТУ, 1999, – 86 с. (**Учебное пособие**)

Статьи

3. Левданский А. Э., Гарабажиу А. А., Левданский Э. И. Энергосберегающая роторно-центробежная мельница для тонкого помола сыпучих и кусковых материалов // Весці НАН Беларусі. Сер. физ.-тех. наук. – 2000. – № 2. – С.134-139.
4. Левданский А. Э., Вилькоцкий А. И., Левданский Э. И. Исследование многоступенчатой проточной мельницы при избирательном измельчении силвинитовой руды // Весці НАН Беларусі. Сер. физ.-тех. наук. – 2002. – № 4. – С.136-140.
5. Левданский А.Э. Исследования и внедрения новых конструкций ударно-центробежных мельниц. // Журн. прикл. химии. – 2004. – Т.77, №6 – С.956-960.
6. Левданский А. Э., Вилькоцкий А. И., Левданский Э. И. Многоступенчатая мельница с проточной классификацией для избирательного измельчения силвинитовой руды // Журн. прикл. химии. – 2002. – Т.75, №11. – С.1881-1884.

7. Левданский А. Э. Исследование ударно-центробежного измельчения материалов // Инж.-физич. журн. – 2004. – Т.77, №5. – С. 46-51.
8. Левданский А. Э. Снижение энергозатрат на измельчение материалов // Энергоэффективность. – 2002. – №1. – С.13-14.
9. Левданский А. Э. Энергосберегающие ударно-центробежные мельницы с проточной классификацией // Энергоэффективность. – 2002. – №2. – С.10-13.
10. Левданский А. Э., Вилькоцкий А. И., Левданский Э. И. Избирательное измельчение силвинитовой руды в многоступенчатой роторно-центробежной мельнице // Хим. пром. – 2002. – №5. – С.37-41.
11. Левданский А. Э., Левданский Э. И. Пути снижения энергозатрат при переработке влажных мелов // Энергоэффективность. – 2001. – №8. – С.18-21.
12. Левданский А. Э., Левданский Э. И., Коморовский С. И. Разработка и исследование нового способа производства извести // Архитектура и строительство. – 1996. – №2. – С.39-40.
13. Исследование поведения частиц при проточном фильтровании суспензий / Левданский Э. И., Волк А. М., Труханович В. Б., Левданский А. Э.; БТИ им. Кирова. – Минск, 1989. – 14 с. Депонирована в ЦИНТИ-химнефтемаш. 9.12.1989. – №20008 – хн.
14. Левданский А. Э., Левданский Э. И., Вилькоцкий А. И. Новые конструкции ударно-центробежных мельниц // Белорусское сельское хозяйство. – 2002. – №3. – С.40-41.
15. Левданский А. Э., Левданский Э. И., Вилькоцкий А. И. Энергосберегающая технология производства крупы // Белорусское сельское хозяйство. – 2002. – №3. – С.41-42.
16. Левданский А. Э., Гвоздев В. А., Левданский Э. И. Установка для приготовления высококонцентрированных суспензий минеральных удобрений // Сейбіт. – 2002. – №4. – С.27-29.
17. Левданский А. Э., Чиркун Д. И., Левданский Э. И. Экспериментальные исследования проточного роторно-центробежного сепаратора // Хим. пром. – 2004. – № 2. – С.64-67.
18. Левданский А. Э., Левданский Э. И. Определение граничного зерна разделения для проточного пластинчатого классификатора, агрегированного с ударно-центробежной мельницей // Хим. пром. – 2004. – № 10. – С.534-536.
19. Левданский А. Э., Левданский Э. И., Волк А. М. Разработка и исследование газоцентробежных классификаторов полидисперсных материалов // Химия и технология неорганических веществ: Труды БГТУ. – Минск, 1993. – Вып.1. – С.65-68.

20. Левданский А. Э., Плехов И. М., Левданский Э. И., Бокун Г. С. Разработка и исследование дискового классификатора // Химия и технология неорганических веществ: Труды БГТУ. – Минск, 1993. – Вып. 1. – С. 74-78.
21. Левданский А. Э., Левданский Э. И. Изучение гидродинамических характеристик закрученных многофазных потоков в перфорированных элементах // Химия и технология неорганических веществ: Труды БГТУ. – Минск, 1994. – Вып. 2. – С. 74-78.
22. Левданский А. Э., Левданский Э. И., Плехов И. М. Определение максимального размера частиц, проходящих через отверстия перфорации в процессах проточного разделения // Химия и технология неорганических веществ: Труды БГТУ. – Минск, 1994. – Вып. 2. – С. 78-82.
23. Левданский А. Э., Левданский Э. И., Гарабажиу А. А. Разработка и исследование роторно-центробежной мельницы с инерционно-гравитационной выгрузкой готового продукта // Химия и технология неорганических веществ: Труды БГТУ. – Минск, 1998. – Вып. 6. – С. 149-155.
24. Гарабажиу А. А., Левданский А. Э. Аэродинамика движения частиц измельченного материала в рабочей камере роторно-центробежной мельницы // Химия и технология неорганических веществ: Труды БГТУ. – Минск, 1999. – Вып. 7. – С. 15-27.
25. Гарабажиу А. А., Левданский А. Э. Методика расчета скорости движения газового потока в рабочей камере роторно-центробежной мельницы // Химия и технология неорганических веществ: Труды БГТУ. – Минск, 1999. – Вып. 7. – С. 28-38.
26. Левданский А. Э., Левданский Э. И. Высокоэффективные процессы и агрегаты, основанные на проточном разделении многофазных систем // Химия и технология неорганических веществ: Труды БГТУ. – Минск, 2000. – Вып. 8. – С. 248-270.
27. Левданский А. Э., Вилькоцкий А. И., Гарабажиу А. А. Исследование роторно-центробежной мельницы с встроенным классификатором // Химия и технология неорганических веществ: Труды БГТУ. – Минск, 2000. – Вып. 8. – С. 271-276.
28. Гарабажиу А. А., Левданский А. Э. Разработка и исследование вихревой мельницы с непрерывной проточной классификацией готового продукта // Химия и технология неорганических веществ: Труды БГТУ. – Минск, 2000. – Вып. 8. – С. 292-305.
29. Левданский А. Э., Левданский Э. И., Вилькоцкий А. И. Некоторые пути энергосбережения при переработке влажных мелов // Химия и технология неорганических веществ: Труды БГТУ. – Минск, 2001. – Вып. 9. – С. 61-66.

30. Левданский А. Э., Гвоздев В. А., Левданский Э. И. Разработка и исследование роторно-центробежной мельницы мокрого помола и растворения твердых материалов // Химия и технология неорганических веществ: Труды БГТУ. – Минск, 2001. – Вып. 9. – С. 67-69.
31. Левданский А. Э., Вилькоцкий А. И., Левданский Э. И. Разработка и создание математической модели процессов проточной классификации в ленточном грохоте // Химия и технология неорганических веществ: Труды БГТУ. – Минск, 2001. – Вып. 9. – С. 125-136.

Тезисы докладов

32. Волк А. М., Левданский А. Э. Разработка и исследование газошленочного сгустителя суспензий // Тезисы докладов III Всесоюзной научной конференции «Гидромеханические процессы разделения гетерогенных систем». – Тамбов. – 1991. – С. 11-12.
33. Левданский А. Э., Левданский Э. И., Гарабажиу А. А. Энергосберегающие роторно-центробежные мельницы для помола извести // Тезисы докладов научно-техн. семинара «Пути энергосбережения при производстве строительных материалов и конструкций». – Минск. – 1998. – С. 57-59.
34. Левданский Э. И., Левданский А. Э., Гарабажиу А. А. Высокоэффективные классификаторы зернистых материалов // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности». – Минск. – 1998. – С. 34-35.
35. Левданский А. Э., Левданский Э. И., Гарабажиу А. А. Энергосберегающие роторно-центробежные мельницы для измельчения сыпучих и кусковых материалов // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности». – Минск. – 1998. – С. 36-37.
36. Левданский А. Э., Вилькоцкий А. И., Гарабажиу А. А. Разработка и исследование роторно-центробежных мельниц с проточной классификацией // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка». – Могилев. – 2000. – С. 46-48.
37. Левданский А. Э., Вилькоцкий А. И., Левданский Э. И. Разработка и исследование многокаскадной роторно-центробежной мельницы // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Ресурсо- и энергосберегающие

- технологии в химической и нефтехимической промышленности». – Минск. – 2000. – С.45-46.
38. Левданский А. Э., Вилькоцкий А. И., Левданский Э. И. Многоступенчатая роторно-центробежная мельница для измельчения сыпучих и кусковых материалов. В сб. "Разработка импортозамещающих технологий и материалов в химической промышленности" Тез. докл. Международной научно-технической конференции. Минск 1999. с.65-66.
 39. Левданский А. Э. Математическая модель процессов проточной классификации в линейном грохоте // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Интерстроймех-2002». – Могилев. – 2002. – С.109-114.
 40. Левданский Э.И., Левданский А. Э., Бобровяч В. А. Интенсификация технологических процессов при использовании проточного разделения многофазных систем // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Интерстроймех-2002». – Могилев. – 2002. – С.114-118.
 41. Левданский А. Э., Вилькоцкий А. И., Левданский Э. И. Исследования обогащения силвинитовой руды в многоступенчатой роторно-центробежной мельнице // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Интерстроймех-2002». – Могилев. – 2002. – С.118-121.
 42. Левданский А. Э., Гвоздев В. А., Левданский Э. И. Ударно-центробежная мельница мокрого помола // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Интерстроймех-2002». – Могилев. – 2002. – С.121-124.
 43. Левданский А. Э., Левданский Э. И., Волк А. М., Чиркун Д. И. Роторный проточный классификатор // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Новые технологии в химической промышленности». – Минск. – 2002. – С.198-201.
 44. Левданский А. Э., Гвоздев В. А., Волк А. М. Мокрый способ помола в роторно-центробежной мельнице // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Новые технологии в химической промышленности». – Минск. – 2002. – С.215-216.
 45. Левданский А. Э. Математическое описание процессов в гидравлических классификаторах проточного типа // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Новые технологии в химической промышленности». – Минск. – 2002. – С.234-236.
 46. Гвоздев В. А., Левданский А. Э., Левданский Э. И. Применение роторно-центробежной мельницы мокрого помола в процессе производства ферментных препаратов // Тезисы докладов Международной научно-техн. конферен-

- ции «Новые технологии в химической промышленности». – Минск. – 2002. – С.261-262.
47. Левданский А. Э. Опыт внедрения и промышленных испытаний ударно-центробежных мельниц // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Центробежная техника – высокие технологии». – Минск. – 2003. – С.19-20.
 48. Левданский Э. И., Левданский А. Э. Центробежные аппараты для разделения в системах газ-жидкость, жидкость-твердое // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Центробежная техника – высокие технологии». – Минск. – 2003. – С.29-34.
 49. Левданский А. Э., Левданский Э. И., Чиркун Д. И. Исследования роторного центробежно-проточного классификатора // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Центробежная техника – высокие технологии». – Минск. – 2003. – С.27-28.
 50. Левданский Э. И., Левданский А. Э. Опыт импортозамещения в технике классификации сыпучих материалов // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов». – Минск. – 2003. – С.108-110.
 51. Левданский А. Э. Промышленные испытания и рекомендации по применению новых конструкций ударно-центробежных мельниц // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов». – Минск. – 2003. – С.110-113.
 52. Левданский А. Э., Чиркун Д. И., Левданский Э. И. Экспериментальные исследования классификации тонкодисперсных порошков в центробежно-проточном классификаторе // Тезисы докладов Международной научно-техн. конференции «Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов». – Минск. – 2003. – С.113-116.

Авторские свидетельства и патенты

53. А. с. 1232302 СССР, МКИ В07 В4/08. Центробежный классификатор / Э. И. Левданский, П. Е. Вайтехович, А. М. Волк, А. Э. Левданский, Е. Г. Твердовская (СССР). – №3826275/29-03; Заявл. 06.11.84; Опубл. 23.05.86, Бюл. №19 // Откр. Изобр. Пром. обр. Тов. зн. – 1984. – №19. – С.38.

54. А. с. 1510951 СССР, МКИ В03 В5/12. Устройство для разделения суспензий / Э. И. Левданский, Н. П. Кохно, И. М. Плехов, А. И. Зайцев, А. Э. Левданский, (СССР). – №4323203/31-26; Заявл. 02.11.87; Оpubл. 30.09.89, Бюл. №36 // Откр. Изобр. Пром. обр. Тов. зн. – 1989. – №36. – С.46.
55. А. с. 1600847 СССР, МКИ В04 С9/00. Фильтр-сгуститель / В. А. Бобрович, Н. П. Кохно, А. Н. Ковалев, А. Э. Левданский (СССР). – №4241054/31-26; Заявл. 08.05.87; Оpubл. 23.10.90, Бюл. №39 // Откр. Изобр. Пром. обр. Тов. зн. – 1990. – №39. – С.44.
56. А. с. 1789264 СССР, МКИ В02 В3/00. Устройство для шелушения зерна / Э. И. Левданский, Ю. М. Костюнин, В. Б. Труханович, А. Э. Левданский (СССР). – №4907519/13-26; Заявл. 04.02.91; Оpubл. 23.01.93, Бюл. №3 // Откр. Изобр. Пром. обр. Тов. зн. – 1993. – №3. – С.3.
57. Пат. 2755 С2 ВУ, МПК В02С13/08. Мельница / А. Э. Левданский, Э. И. Левданский, И. И. Демидчик, С. В. Радашкевич (РБ). – №960328; Заявл. 01.07.96; Оpubл. 30.03.99 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. Пат. Ведамства РБ. – 1999. – №1. – С.98.
58. Пат. 3006 С2 ВУ, МПК В02С15/04. Валково-тарельчатая мельница / А. Э. Левданский, Э. И. Левданский, И. И. Демидчик, С. В. Радашкевич (РБ). – №960334; Заявл. 01.07.96; Оpubл. 30.09.99 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. Пат. Ведамства РБ. – 1999. – №3. – С.97.
59. Пат. 3010 С2 ВУ, МПК В02С13/14. Мельница / А. Э. Левданский, Э. И. Левданский, В. С. Володько, И. И. Демидчик, С. В. Радашкевич (РБ). – №960330; Заявл. 01.07.96; Оpubл. 30.09.99 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. Пат. Ведамства РБ. – 1999. – №3. – С.96.
60. Пат. 3011 С2 ВУ, МПК В02С7/08. Мельница / А. Э. Левданский, В. С. Володько, Э. И. Левданский, И. И. Демидчик, С. В. Радашкевич (РБ). – №960332; Заявл. 01.07.96; Оpubл. 30.09.99 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. Пат. Ведамства РБ. – 1999. – №3. – С.96.
61. Пат. 3054 С2 ВУ, МПК В02С13/08. Мельница / А. Э. Левданский, В. С. Володько, Э. И. Левданский, И. И. Демидчик, С. В. Радашкевич (РБ). – №960331; Заявл. 01.07.96; Оpubл. 30.03.99 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. Пат. Ведамства РБ. – 1999. – №3. – С.96.
62. Пат. 4706 С2 ВУ, МПК В02С13/14. Мельница / А. Э. Левданский, А. И. Вилькоцкий, Э. И. Левданский, С. Э. Левданский (РБ). – №19990428; Заявл. 29.04.99; Оpubл. 30.09.02 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. Пат. Ведамства РБ. – 2002. – №3. – С.110.
63. Пат. 4707 С2 ВУ, МПК В02С13/14. Мельница / А. Э. Левданский, А. А. Гарабажиу, Э. И. Левданский, С. Э. Левданский (РБ). – №19990427; Заявл. 29.04.99;

- Опубл. 30.09.02 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. Пат. Ведамства РБ. – 2002. – №3. – С.110.
64. Пат. 5061 С2 ВУ, МПК В07В4/08. Пневмосепаратор / Э. И. Левданский, А. Э. Левданский, С. Э. Левданский (РБ). – №19990403; Заявл. 27.04.99; Опубл. 30.03.03 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. Пат. Ведамства РБ. – 2003. – №1. – С.103.
65. Пат. 6222 С2 ВУ, МПК В07В4/08. Машина для измельчения материалов. / А. Э. Левданский, Э. И. Левданский, А. И. Вилькоцкий (РБ). – №20000256; Заявл. 21.03.00; Опубл. 30.03.04 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. Пат. Ведамства РБ. – 2004. – №1. – С.98.
66. Пат. 5976 С2 ВУ, МПК В07В4/08. Устройство для растворения материалов / А. Э. Левданский, В. А. Гвоздев, Э. И. Левданский, А. И. Вилькоцкий (РБ). – №20000255; Заявл. 21.03.00; Опубл. 30.03.04 // Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. Пат. Ведамства РБ. – 2004. – №1. – С.98.

Основные условные обозначения

C – коэффициент характеризующий свойства материала; D – диаметр конструктивного элемента, м; D_2 – диаметр ротора по наружным кромкам лопаток, м; $D_{(s)}$ – функция распределения по проходу, %; F – сила, Н; G – производительность, кг/с; L – длина, м; N – мощность, Вт; P – давление, Па; Q – расход, м³/с; R – радиус, м; S – площадь, м²; U – скорость жидкости, м/с; V – скорость частицы, конструктивного элемента машины, м/с; W – скорость газа, м/с; a – ускорение, м/с²; b – конструктивный размер (зазора, лопатки), м; c – коэффициент живого сечения в перфорированной стенке; d – диаметр отверстия, м; f – коэффициент трения-скольжения частицы; g – ускорение свободного падения, м/с²; k – эмпирический коэффициент; l – геометрический размер, м; m – масса частицы материала, кг; ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с.

Индексы: $г-д$ – гидродинамическая; $г$ – газа; $ист$ – истечения; $кр$ – критическая; $лоп$ – лопатки; $с$ – кориолисова составляющая; $ср$ – среднерасходная; $ч$ – частицы; $экв$ – эквивалентная величина; $эл$ – элемент; r – радиальная составляющая; ϕ – окружная составляющая; τ – тангенциальная составляющая; ∞ – в основном потоке.

А. И. Вилькоцкий

НАВУКОВА-ПРАКТЫЧНЫЯ АСНОВЫ ПРЫМЯНЕННЯ ПРАТОЧНЫХ ЦЯЧЭННЯЎ ДЛЯ ІНТЭНСІФІКАЦЫІ ПРАЦЭСАЎ КЛАСІФІКАЦЫІ І ЗДРАБНЕННЯ

Ключавыя словы: класіфікацыя, здрабненне, эфектыўнасць, энергаспажыванне, прадукцыйнасць, хуткасць, дысперснасць, лапаткі, млын, сепаратар, часцінка.

Прадметам даследавання з'яўляюцца новыя канструкцыі праточных класіфікатараў і ўдарна-цэнтрабежных млыноў з безупыннай праточнай класіфікацыяй на прадмет вызначэння іх працаздольнасці, эфектыўнасці, прадукцыйнасці і энергаўжывання.

Мэта даследавання – на аснове навуковага абгрунтавання стварэнне высокаэфектыўных аграгатаў для здрабнення і класіфікацыі матэрыялаў. Высокая эфектыўнасць павінна дасягацца за кошт павышэння якасці здрабнення і класіфікацыі, зніжэння энергаемістасці працэсу здрабнення, зніжэння капітальных выдаткаў і матэрыялаемістасці пры стварэнні новых аграгатаў.

У рабоце на аснове тэарэтычнага аналізу існуючых вытворчых класіфікатараў і млыноў вызначаны шляхі іх удасканалення. Распрацаваны новы спосаб класіфікацыі, апараты для яго ажыццяўлення і на іх базе створаны канструкцыі млыноў з безупыннай класіфікацыяй і выдаленнем гатовага прадукту з зоны здрабнення. Праведзены тэарэтычныя і эксперыментальныя даследаванні праточных класіфікатараў з мэтай вызначэння іх эфектыўнасці, энергаемістасці і прадукцыйнасці.

Канструкцыі класіфікатараў і млыноў знайшлі шырокае прымяненне ў разнастайных галінах вытворчасці і існуе вялікі попыт на распрацаваныя канструкцыі. Для задавальнення попыту на новыя канструкцыі млыноў і класіфікатараў арганізавана іх серыйная вытворчасць.

Левданский Александр Эдуардович

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОТОЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ КЛАССИФИКАЦИИ И ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Ключевые слова: классификация, измельчение, эффективность, энергопотребление, производительность, скорость, дисперсность, лопатки, мельница, сепаратор, частица.

Предметом исследования являются новые конструкции проточных классификаторов и ударно-центробежных мельниц с непрерывной проточной классификацией на предмет определения их работоспособности, эффективности, производительности и энергопотребления.

Цель исследования – на основе научного обоснования создание высокоэффективных агрегатов для помола и классификации материалов. Высокая эффективность должна достигаться за счет повышения качества помола и классификации, снижения энергоемкости процесса измельчения, снижения капитальных затрат и материалоемкости при создании новых агрегатов.

В работе на основе теоретического анализа существующих промышленных классификаторов и измельчителей определены пути их совершенствования. Разработан новый способ классификации, аппараты для его осуществления и на их базе созданы конструкции измельчителей с непрерывной классификацией и удалением готового продукта из зоны измельчения. Проведены теоретические и экспериментальные исследования проточных классификаторов с целью определения их эффективности, энергоемкости и производительности.

Конструкции классификаторов и измельчителей нашли широкое применение в различных отраслях производства и ощущается большой спрос на разработанные конструкции. Для удовлетворения спроса на новые конструкции мельниц и классификаторов организовано серийное их производство.

THE RESUME

Levdansky Alexander Eduardovich

**SCIENTIFIC-PRACTICAL BASES OF APPLICATION
OF FLOWING CURRENTS FOR THE INTENSIFICATION
OF PROCESSES OF CLASSIFICATION AND CRUSHING**

Keywords: classification, crushing, efficiency, энергопотребление, productivity, speed, dispersiveness, лопатки, a mill, a separator, a particle.

Object of research are new designs of flowing classifiers and shock-centrifugal mills with continuous flowing classification for definition of their working capacity, efficiency, productivity and энергопотребления.

The purpose of research - on the basis of a scientific substantiation creation of highly effective units for a grinding and classifications of materials. High efficiency should be reached due to improvement of quality of a grinding and classification, decrease in power consumption of process of crushing, decrease in capital expenses and материалоемкости at creation of new units.

In work on the basis of the theoretical analysis of existing industrial classifiers and grinders ways of their perfection are determined. The new way of classification, devices for his realization is developed and on their base designs of grinders with continuous classification and removal of a ready product from a zone of crushing are created. Are lead theoretical and experimental researches of flowing classifiers with the purpose of definition of their efficiency, power consumption and productivity.

Designs of classifiers and grinders have found wide применение in various branches of manufacture and the great demand for the developed designs is felt. For satisfaction of demand for new designs of mills and classifiers their serial manufacture is organized.

Левданский Александр Эдуардович

**НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ
ПРОТОЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ
ПРОЦЕССОВ КЛАССИФИКАЦИИ И ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ**

Подписано в печать 23.09.2004. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Тайм. Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 2,6.
Тираж 85 экз. Заказ ~~547~~

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет». 220050, Минск, Свердлова, 13а.

Лицензия ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220050, Минск, Свердлова, 13.