

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 324.354(478)+504.062

И. В. Войтов

Белорусский государственный технологический университет

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОСНОВНЫХ ФУНКЦИЙ И ПРОЦЕССОВ ОБОГАЩЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В БЕЛАРУСИ

В статье кратко изложены основные функции, процессы и методы обогащения природных полезных ископаемых. Наиболее часто в практике обогащения используются гравитационные, флотационные и магнитные методы обогащения. Специальные методы обогащения включают: ручную рудоразборку, радиометрическое обогащение, обогащение по трению и форме, обогащение по упругости, термоадгезионное обогащение, а также обогащение, основанное на селективном изменении размера куска при дроблении. Обогащение полезных ископаемых позволяет повысить экономическую эффективность их дальнейшей переработки, а также дает возможность их комплексного использования, так как предварительное обогащение позволяет извлечь не только основные полезные компоненты, но и выделить из минерального сырья те вредные примеси, которые при дальнейшей его переработке могут загрязнять окружающую среду, угрожая здоровью людей и ухудшая качество конечной продукции.

Уделено внимание практическому применению технологии обогащения и вакуумного формования органогенной массы, которая прошла опытное внедрение на ОАО «Зеленоборское».

Ключевые слова: природные полезные ископаемые, процессы обогащения полезных ископаемых, вакуумное формование органогенной массы.

I. V. Voitau

Belarusian State Technological University

SCIENTIFIC AND PRACTICAL ASPECTS OF BASIC FUNCTIONS AND PROCESSES OF ENRICHMENT OF NATURAL USEFUL FOSSILS IN BELARUS

The article summarizes the main functions, processes and methods of enrichment of natural minerals. Most often in the practice of enrichment, gravitational, flotation, and magnetic enrichment methods are used. Special enrichment methods include: manual ore dressing, radiometric enrichment, enrichment by friction and shape, enrichment by elasticity, thermal adhesive enrichment, as well as enrichment based on the selective change in the size of the piece during crushing. The enrichment of minerals allows you to increase the economic efficiency of their further processing, as well as the comprehensive use of minerals, since preliminary enrichment allows you to extract not only the main useful components, but also to isolate those harmful impurities from mineral raw materials that can be further processed pollute the environment, threatening human health and the deterioration of the quality of the final product.

Attention is paid to the practical application of the technology of enrichment and vacuum formation of organogenic mass, which has undergone pilot implementation at OAS "Zelenoborskoye".

Key words: natural minerals, mineral processing, vacuum molding of organogenic mass.

Введение. Обогащение полезных ископаемых – это совокупность процессов механической переработки минерального сырья с целью извлечения полезных (ценных) компонентов и удаления пустой породы и вредных примесей. В результате обогащения из руды получают концентрат (концентраты) и хвосты.

Обогащение полезных ископаемых позволяет повысить экономическую эффективность

их дальнейшей переработки, к тому же в некоторых случаях дальнейшая переработка становится вообще невозможной без стадии обогащения. Например, медные руды (содержащие, как правило, весьма мало меди) нельзя непосредственно переплавить в металлическую медь, так как медь при плавке переходит в шлак. Кроме того, обогащение полезных ископаемых позволяет [1]:

– увеличить промышленные запасы сырья за счет использования месторождений бедных полезных ископаемых с низким содержанием ценных компонентов;

– повысить производительность труда на горных предприятиях и снизить стоимость добываемой руды за счет механизации горных работ и сплошной выемки полезного ископаемого вместо выборочной;

– комплексно использовать полезные ископаемые, так как предварительное обогащение позволяет извлечь не только основные полезные компоненты, но и сопутствующие, содержащиеся в малых количествах;

– снизить расходы на транспортирование к потребителям более богатых продуктов, а не всего объема добываемого полезного ископаемого;

– выделить из минерального сырья те вредные примеси, которые при дальнейшей его переработке могут загрязнять окружающую среду и тем самым угрожать здоровью людей и ухудшать качество конечной продукции.

Обогащенные методы также можно использовать при переработке твердых бытовых отходов (их образуется 350–400 кг/год на человека).

Полезные ископаемые на обогатительных фабриках проходят целый ряд последовательных операций, в результате которых полезные компоненты отделяются от примесей. Процессы обогащения полезных ископаемых по своему назначению делятся на подготовительные, вспомогательные и основные.

К *подготовительным* относят процессы дробления, измельчения, грохочения и классификации. Их задача – разединить полезный минерал и пустую породу («раскрыть» сростки) и создать нужную гранулометрическую характеристику перерабатываемого сырья.

Основная часть. Основные процессы обогащения природных полезных ископаемых. Задача основных процессов обогащения – разделить полезный минерал и пустую породу. В их основе лежат различия в физических и физико-химических свойствах разделяемых минералов [1, 2].

Наиболее часто в практике обогащения используются гравитационные, флотационные и магнитные методы обогащения.

Гравитационный метод обогащения. Гравитационным называют метод, в котором разделение минеральных частиц, отличающихся плотностью, размером и формой, обусловлено различием в характере и скорости их движения в текучих средах под действием силы тяжести и сил сопротивления. Гравитационный метод занимает ведущее место среди других методов обогащения. Гравитационный метод представлен рядом процессов. Они могут быть соб-

ственно гравитационными (разделение в поле силы тяжести – обычно для относительно крупных частиц) и центробежными (разделение в центробежном поле – для мелких частиц). Если разделение происходит в воздушной среде, то процессы называют пневматическими; в остальных случаях – гидравлическими. Наибольшее распространение в обогащении получили собственно гравитационные процессы, осуществляемые в воде.

По типу используемых аппаратов гравитационные процессы можно разделить на отсадку, обогащение в тяжелых средах, концентрацию на столах, обогащение на шлюзах, в желобах, винтовых сепараторах, на центробежных концентраторах, противоточных сепараторах и др. Также к гравитационным процессам обычно относят промывку.

Гравитационные процессы используют при обогащении углей и сланцев, золото- и платиносодержащих руд, оловянных руд, окисленных железных и марганцевых руд, хромовых, вольфрамитовых и руд редких металлов, строительных материалов и некоторых других видов сырья.

Пневматические процессы обогащения основаны на принципе разделения полезных ископаемых по крупности (пневматическая классификация) и плотности (пневматическая концентрация) в восходящей или пульсирующей струе воздуха. Он применяется при обогащении углей, асбеста и других полезных ископаемых, обладающих незначительной плотностью; при классификации фосфоритов, железных руд, сурика и других полезных ископаемых в циклах дробления и сухого измельчения, а также при обеспыливании воздушных потоков в цехах обогатительных фабрик. Применение пневматического метода обогащения целесообразно в суровых климатических условиях северных и восточных районов Сибири или в районах, где ощущается недостаток воды, а также для переработки полезных ископаемых, содержащих легкоразмокаемую породу, образующую большое количество шламов, нарушающих четкость разделения. Преимущества пневматических процессов – в их экономичности, простоте и удобстве утилизации хвостов обогащения, главный недостаток – в сравнительно низкой эффективности разделения из-за чего эти процессы используются весьма редко

Флотационный метод обогащения. Флотацию применяют для обогащения большинства руд цветных металлов, апатитовых, фосфоритовых, графитовых, флюоритовых и других руд, широко используют в сочетании с другими методами при обогащении руд черных металлов, угля. Широкая распространенность флотации объясняется универсальностью процесса, свя-

занной с возможностью разделения практически любых минералов, обогащения бедных руд с весьма тонкой вкрапленностью полезных минералов. Основные недостатки флотационного метода – в экологической вредности процесса и относительно высокой его стоимости.

Флотация основана на различном закреплении частиц разделяемых минералов на межфазной границе, что определяется различием в смачиваемости. При пенной флотации, наиболее применяемой в промышленности, пульпу насыщают газом, и частицы некоторых (несмачиваемых) минералов прилипают к пузырькам газа и всплывают на поверхность, образуя минерализованную пену, которая легко удаляется механическим путем. Другие минералы (смачиваемые) не прилипают и остаются в объеме пульпы.

По способу насыщения пульпы газом различают несколько видов пенной флотации, однако наибольшее распространение получило насыщение пульпы воздухом.

Магнитный метод обогащения. Магнитные методы обогащения основаны на различиях в магнитных свойствах разделяемых минералов. Магнитные методы широко применяются при обогащении руд черных металлов, доводке концентратов редких и цветных металлов, регенерации сильномагнитных утяжелителей, удаления железистых примесей.

Магнитный момент – основная величина, характеризующая намагниченность тел. Магнитный момент, отнесенный к единице объема вещества, называется намагниченностью, к единице массы – удельной намагниченностью.

Основной силовой характеристикой магнитного поля является напряженность. Напряженностью H магнитного поля называется сила, с которой поле воздействует на единицу положительной магнитной массы, помещенной в данной точке поля. Единицей напряженности в системе СИ является ампер на метр (А/м).

Магнитные свойства минералов характеризуются магнитной восприимчивостью и магнитной проницаемостью. Магнитная восприимчивость – физическая величина, характеризующая способность того или иного тела изменять интенсивность собственной намагниченности. Различают объемную и удельную магнитную восприимчивость. Объемная магнитная восприимчивость χ_0 равна отношению намагниченности тела I к напряженности магнитного поля H , в котором находится тело:

$$\chi_0 = \frac{I}{H}. \quad (1)$$

Удельная магнитная восприимчивость χ_y – магнитная восприимчивость, отнесенная к единице массы тела, г/см³:

$$\chi_y = \frac{\chi_0}{\rho}, \quad (2)$$

где ρ – плотность тела, г/см³.

По магнитным свойствам все минералы и горные породы принято классифицировать на сильномагнитные, слабомагнитные и немагнитные.

К сильномагнитным, или ферромагнитным, относятся минералы (магнетит, пирротин и др.) с удельной магнитной восприимчивостью не менее $3 \cdot 10^3$ г/см³, извлекаемые на сепараторах со слабым полем напряженностью H до 1500 Э (до 120 кА/м).

К слабомагнитным относится большая группа минералов (например, гематит, ильменит, гранат) с небольшой удельной магнитной восприимчивостью – от $3 \cdot 10^3$ до $15 \cdot 10^6$ г/см³. Извлечение этих минералов при магнитном обогащении производится на сепараторах с сильным полем напряженностью 10 000–20 000 Э (от 800 до 1600 кА/м).

К немагнитным относятся минералы (кварц, апатит и др.), обладающие удельной магнитной восприимчивостью менее $15 \cdot 10^6$ г/см³ и не извлекаемые методами магнитной сепарации на современных сепараторах с полем напряженностью до 20 000 Э.

Электрическое обогащение. Электрические методы обогащения основаны на различиях в электрических свойствах разделяемых минералов и осуществляются под влиянием электрического поля.

Электрические методы применяются для мелких (–5 мм) сухих сыпучих материалов, обогащение которых другими методами затруднено или неприемлемо по экономическим или экологическим соображениям.

Из многочисленных электрических свойств минералов в основу работы промышленных сепараторов положено два: электропроводность и трибоэлектрический эффект. В лабораторных условиях может также использоваться различие в диэлектрической проницаемости, пироэлектрический эффект.

Мерой электропроводимости вещества служит удельная электропроводность λ , численно равная электропроводности проводника длиной 1 см с поперечным сечением 1 см², измеряемая в омах в минус первой степени на сантиметр в минус первой степени (Ом⁻¹/см⁻¹). В зависимости от электропроводимости все минералы условно делят на три группы: проводники, полупроводники и непроводники (диэлектрики).

Сущность электрического способа обогащения состоит в том, что на частицы, имеющие различный заряд, в электрическом поле дей-

ствует разная по значению сила, поэтому они движутся по различным траекториям. Главная сила, действующая в электрических методах, – кулоновская сила:

$$F_э = Q \cdot E, \quad (3)$$

где $F_э$ – сила электрического поля (ньютон); Q – заряд частицы (кулон); E – напряженность поля (В/м).

Электрические методы обогащения относительно широко применяют при переработке руд редких металлов, они особенно перспективны в засушливых районах, так как не требуют воды. Также электрические методы можно использовать для разделения материалов по крупности (электрическая классификация) и для очистки газов от пыли.

Специальные методы обогащения. Они включают ручную рудоразборку, радиометрическое обогащение, обогащение по трению и форме, обогащение по упругости, термоадгезионное обогащение, а также обогащение, основанное на селективном изменении размера куска при дроблении [1, 2].

Ручная сортировка (рудоразборка) представляет собой метод обогащения, при котором используется разница во внешних признаках (цвет, блеск, форма) минералов. Например, в маритовой руде часто присутствуют сплошные включения известняка. Раздробив такую руду до крупности 100 мм, легко можно выбрать куски известняка.

Радиометрическое обогащение применяют при переработке руд цветных металлов (радиоактивных, редких, тяжелых и др.), алмазов, флюоритовых руд. Принцип всех способов радиометрического обогащения одинаков: на руду, перемещаемую в пространстве, действует какое-либо излучение от источника; сигнал, возникающий от взаимодействия минералов с этим излучением, улавливается приемником; информация передается в специальный прибор – радиометр, где она обрабатывается и подается команда на исполнительный механизм, направляющий кусок или в сборник концентрата, или в сборник хвостов. Для отсеивания посторонних сигналов в схеме предусматривается установка фильтров. В случае авторадиметрического обогащения схема значительно упрощается, так как радиоактивные минералы сами испускают излучение. В качестве первичного используются излучения широкого диапазона длины волн, от самых коротких гамма-излучений до самых длинных радиоволн. По длине волны различают следующие группы первичного излучения, применяемого в радиометрических сепараторах (табл. 1) [1].

Таблица 1

Показатели излучения, применяемого в радиометрических сепараторах

Характер излучения	Длина волны, нм (нм – 10^{-9} м)
Гамма	$<10^{-3}$
Бета	$10^{-3}-10^{-2}$
Нейтронное	$10^{-2}-10^{-1}$
Рентгеновское	$10^{-1}-10$
Ультрафиолетовое	$3 \cdot 10^2$
Видимый свет	$3,8-7,6 \cdot 10^2$
Инфракрасное	10^2-10^4
Радиоволны	10^5-10^{14}

По характеру взаимодействия минералов с первичным излучением различают следующие группы: 1) возбуждение вторичного излучения (люминесценции, нейтронного и др.); 2) отражение первичного излучения; 3) поглощение (абсорбция) первичного излучения.

Одними из самых распространенных способов радиометрического обогащения нерадиоактивных руд являются фотометрический и рентгенолюминесцентный.

Рентгено-люминесцентный метод основан на различиях в интенсивности люминесценции (холодного свечения) минералов под влиянием рентгеновского излучения. Процесс люминесценции складывается из трех стадий: поглощения энергии возбуждающего излучения, преобразования и передачи энергии возбуждения внутрь тела и испускания света в центрах свечения с возвращением минерала в равновесное состояние. Способностью люминесцировать обладают многие минералы: шеллит, флюорит, алмаз и др. Люминесценция большей части минералов обусловлена присутствием в них примесей-активаторов (люминогенов).

Фотометрический метод основан на использовании различий в способности минералов отражать, пропускать или преломлять свет.

Обогащение по трению и форме. Скорость движения частиц по наклонной плоскости (при заданном угле наклона) зависит от состояния поверхности самих частиц, их формы, влажности, плотности, крупности, свойств поверхности, по которой они перемещаются, характера движения (качение или скольжение), а также среды, в которой происходит разделение [1, 2]. Основным параметром, характеризующим минеральные частицы с точки зрения движения их по наклонной плоскости, является коэффициент трения, величина которого определяется в основном формой минеральных частиц. Обогащение по трению будет тем благоприятнее, чем больше разница в коэффициенте трения для частиц пустой породы и полезных минералов.

Частицы могут перемещаться под действием собственной силы тяжести (при движении по наклонным плоскостям), центробежной силы (при движении по горизонтальной плоскости вращающегося диска) и в результате комбинированного действия сил собственной тяжести, центробежной и трения (винтовые сепараторы).

Термоадгезионный способ обогащения заключается в том, что при облучении руды световым потоком темноцветные минералы нагреваются сильнее, чем светлые. Попадая затем на конвейер, поверхность которого покрыта термочувствительным материалом (температура пластификации 30–50°C), более нагретые темноцветные минералы прилипают к этой поверхности, а светлые минералы не прилипают и движутся по своей траектории. Способ широко применяется при обогащении каменных солей.

Процесс обогащения по твердости заключается в том, что при измельчении минерального сырья разрушаются более мягкие материалы. Более твердые остаются в крупных кусках. Затем на грохотах или классификаторах отделяют мелкий продукт от крупного. Такой процесс называют избирательным измельчением. Очень часто дробление и грохочение совмещены в одном аппарате. Способ широко применяется при обогащении углей и осуществляется в барабанных дробилках.

Комбинированные методы обогащения. В комбинированных методах наряду с традиционными способами обогащения используются пиро- или гидрометаллургические операции, приводящие к изменению химического состава сырья. Используемые пирометаллургические операции: обжиг, плавка, конвертирование; гидрометаллургические: выщелачивание, осаждение, экстракция, сорбция [1].

Например, обжиг применяется для изменения магнитных свойств слабомагнитных минералов железа (карбонатов, окислов, гидроокислов). При нагревании до 600–800°C гематит (красный железняк Fe_2O_3) восстанавливается газообразными или твердыми восстановителями (окись углерода, водород, природный газ, уголь и др.) до сильномагнитного магнетита (Fe_3O_4). Процесс этот иногда называют восстановительным обжигом. Обоженную руду обогащают на магнитных сепараторах со слабым магнитным полем аналогично обогащению природных магнетитовых руд.

Гидрометаллургические операции (химическое обогащение) применяют для руд сложного состава. Основа химического обогащения – это селективное растворение минералов и последующее извлечение ценных компонентов из растворов. При этом используется различная способность разделяемых минералов растворяться.

Обогащительные фабрики. Наиболее экономичным является размещение обогащительной фабрики непосредственно у месторождения. При работе фабрики выделяются пыль, дымовые газы, поэтому ее располагают на достаточном удалении от населенных пунктов с подветренной стороны [1].

Обогащительная фабрика обычно состоит из цеха крупного дробления (отдельный корпус); склада крупнодробленой руды; цеха среднего и мелкого дробления (отдельный корпус); главного корпуса (цеха обогащения), включающего отделение измельчения и отделение обогащения; цеха обезвоживания, включающего отделение сгущения, фильтрования, сушки; складов готовой продукции; хвостового хозяйства. Кроме того, в состав фабрики входят административно-бытовой корпус, вспомогательные цеха и службы.

Комбинированный метод технологии обогащения и вакуумного формования органо-генной массы. В данном подразделе статьи приведен практический материал по применению технологии обогащения и вакуумного формования органо-генной массы, разработанный в научно-исследовательской работе С. Г. Шульдовой, выполненной в БНТУ в 2012 г. [3].

Формованные из органо-генной гидромассы изделия получили широкое распространение как емкости для выращивания рассады и саженцев сельскохозяйственных культур (торфяные горшочки) и упаковки для самых различных товаров.

Самой распространенной технологией получения таких изделий является обогащение органо-генного сырья, включающее приготовление гидромассы посредством разделения материала в водной среде, удаление крупных фракций и добавление минеральных удобрений с последующим вакуумным формованием и сушкой. По такой же технологии получают упаковочные изделия из гидромассы на основе макулатуры, что позволяет не только производить высококачественную и экологически чистую упаковку, но и утилизировать отходы.

В связи с увеличением потребности в торфяной продукции для овощеводства и садоводства, ростом экологических требований к упаковке можно было с большой вероятностью прогнозировать дальнейшее развитие технологий обогащения и вакуумного формования изделий из органо-генной гидромассы, что соответствовало бы приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2010–2015 гг. и на период до 2020 гг.

Развитие этих технологий невозможно без изучения свойств используемого при этом

сырья, процессов его переработки, их моделирования и оптимизации. Поэтому особую остроту и актуальность приобретает проблема формирования общих принципов и методики обеспечения оптимальных с точки зрения эффективности параметров технологии обогащения и вакуумного формования изделий из органогенной гидромассы.

Основная цель научно-исследовательской работы С. Г. Шульдовой заключалась в разработке научно-методических основ обеспечения оптимальных параметров технологии обогащения и вакуумного формования изделий из смеси жидкости с сырьем органогенного происхождения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- определены физико-механические свойства органогенной гидромассы, установлена их взаимосвязь и закономерности пространственно-временной изменчивости;

- оценено влияние свойств гидромассы на режимы технологического процесса обогащения и вакуумного формования, а также качественные показатели формованных изделий;

- в результате анализа взаимовлияния размеров пробоотборника и частиц твердого в гидромассе теоретически обоснованы объем проб для получения достоверных результатов при исследовании свойств гидромассы в процессах ее приготовления и транспортирования;

- обоснованы критерии оптимизации и разработана математическая модель технологического процесса обогащения и вакуумного формования изделий из органогенной гидромассы;

- на основе анализа математической модели с использованием разработанного программного обеспечения для ЭВМ предложена методика расчета и рекомендации по обеспечению оптимальных параметров технологии;

- на основе статистических данных по эксплуатации технологической линии производства торфяных горшочков и бугорчатой упаковки на ОАО «Зеленоборское» установлена возможность повышения производительности технологической линии и снижения удельных затрат топлива и энергии.

Используемые в технологии обогащения сырья и вакуумного формования изделий гидросмеси при достижении определенной концентрации твердых частиц проявляют вязкопластичные свойства, обусловленные процессами структурообразования в гидросмеси. При оценке вязкопластичного течения гидромассы органогенных систем автором исследования было использовано уравнение З. П. Шульмана [3]:

$$\tau^{n_1} = \tau_0^{n_1} + (\eta_{пл} \cdot \dot{\epsilon}) \frac{1}{m_1}, \quad (4)$$

где τ – напряжение сдвига; τ_0 – предел текучести; $\eta_{пл}$ – пластическая вязкость, $\dot{\epsilon}$ – градиент скорости; n_1 , m_1 – реологические параметры, определяемые природой вещества и его внутренней структурой.

Эта формула отражает нелинейность вязкости и обобщает большинство употребляемых в настоящее время моделей: Ньютона ($\tau_0 = 0$; $m_1 = n_1 = 0$), Шведова – Бингама ($m_1 = n_1 = 1$), Оствальда – Вейля ($\tau_0 = 0$), Кэссона ($m_1 = n_1 = 2$) и др.

Для оценки процессов гидравлического розпуска и перемешивания сырья были использованы показатели энергетической эффективности и качества перемешивания либо степени переработки гидромассы.

Эффективность перемешивания определена количеством затрачиваемой на перемешивание энергии. Связь между мощностью и условиями процесса была выражена зависимостью

$$N = K_N \cdot \rho \cdot n_0^3 \cdot d_0^5, \quad (5)$$

где K_N – критерий мощности, аналог критерия Эйлера; ρ – плотность гидромассы; n_0^3 – частота вращения ротора (или перемешивающего устройства); d_0^5 – наибольший диаметр расположения кромок ротора.

Метод расчета гидротранспорта базируется на установлении рабочей скорости движения гидросмеси и потерь давления, обеспечивающих эти условия.

Потери давления на трение определены по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$\Delta p_{тр} = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot v_{ср}^2}{2}, \quad (6)$$

где λ – безразмерный коэффициент, являющийся функцией обобщенного критерия Re^* Рейнольдса для вязкопластичной гидросмеси; L , D – размеры трубы; $v_{ср}$ – средняя скорость потока.

Анализ многочисленных исследований, выполненный при изучении движения вязкопластичных гидросмесей торфяных и бумажных масс, свидетельствует о возможности применения формулы Дарси – Вейсбаха, если известны соотношения для коэффициента λ .

Расчет полных потерь давления представлен в выражении

$$\sum \Delta p = \Delta p_{тр} + \Delta p_{м} + \Delta p_{п}, \quad (7)$$

где $\Delta p_{тр}$ – линейные потери давления трения; $\Delta p_{м}$ – местные потери давления; $\Delta p_{п}$ – потери

давления на преодоление разности высот между началом и концом трубопровода.

В научно-практической работе С. Г. Шульдовой изложены методология и методы проведения исследований и обработки экспериментальных данных, а также разработанная методика определения объема пробы при оценке однородности состава гидромассы в процессах ее приготовления и транспортирования.

Контроль качества гидромассы проводится по величине концентрации, которая выражается процентным содержанием абсолютно сухого вещества в пробе, и степени помола А. Степень помола А определялась с помощью аппарата Шоппер-Риглера (ШР), действие которого основано на фильтрационных свойствах гидросмеси.

В качестве прибора для определения реологических свойств пульпы использовался ротационный вискозиметр Реотест-2 с измерительной системой в виде коаксиальных цилиндров.

Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью методов математической статистики в соответствии с общепринятой методикой, которая заключается в составлении выборок из результатов наблюдений, их анализа с целью нахождения интегральных или дифференциальных функций распределения, и установления статистических зависимостей между исследуемыми величинами. Для оценки согласованности теоретического и статистического распределений использовались критерий χ – потери давления на преодоление разности высот между началом и концом трубопровода.

При оценке качества перемешивания (степени переработки) посредством отбора проб важное значение имело обоснование объема проб и их количества, для того чтобы с необходимой точностью охарактеризовать действительное распределение твердого в смеси и реологические свойства пульпы. Объем пробы был установлен на основании анализа взаимовлияния размеров пробоотборника и частиц твердого. Достоверность исследований обусловлена требованием, чтобы коэффициент вариации V_g массы проб m_g , отбираемых из объема v , был меньше или равен некоторой величине α , соответствующей точности проведенных исследований, то есть

$$V_g = \frac{\sigma_g}{m_g} \leq \alpha, \quad (8)$$

где $\sigma_g = \sqrt{d_g} \cdot \sigma_g$ – среднеквадратическое отклонение массы пробы (здесь d_g – дисперсия); m_g – ее математическое ожидание.

В случае когда процесс приготовления гидросмеси закончен, математическое ожидание

массы твердого в пробе определено как $m_{ч} = q \cdot m_g$, а дисперсия – $d_{ч} = q \cdot (1 - q) \cdot m_g^2$.

Тогда $m_{ч}$ и $d_{ч}$ находятся в прямой пропорциональной зависимости от массы пробы m_g , а коэффициент вариации V_g , %, изменяется от массы пробы m_g по зависимости

$$V_g = 100 \sqrt{\frac{(1 - q) \cdot m_{ч}}{q \cdot m_g}}, \quad (9)$$

где $m_{ч}$ – масса отдельной частицы; q – вероятность появления частиц твердого в пробе; $d_{ч}$ – дисперсия частицы; $m_g = k_{ч} \cdot m_{ч} \cdot m_b$ (здесь $k_{ч}$ – число частиц; m_b – масса жидкости в пробе пульпы).

Формула (9) использовалась для выбора необходимой массы пробы по заданному коэффициенту вариации.

Таким образом, теоретически обоснован объем проб для получения достоверных результатов исследований характеристик гидромассы и их дальнейшей обработки приведенными методами и средствами.

В задачи анализа работы технологической линии ОАО «Зеленоборское» (предприятие было выбрано в качестве практической апробации проведенных исследований) входило изучение характера изменений производительности и удельных затрат энергии и газа за длительный период эксплуатации линии, а также определение статистических характеристик, закономерностей распределения значений этих величин и взаимосвязей между ними. Установлено, что посменные удельные затраты газа уменьшились с ростом производительности согласно зависимости

$$P_{п} = 379,9 \cdot П^{-0,56}, \quad (10)$$

где $P_{п}$ – расход газа $m^3/1000$ шт.; $П$ – производительность в смену, тыс. шт. Критерий детерминации R^2 составил 0,77.

Таким образом, были получены соотношения по качественным показателям гидросмеси и формованных изделий. Установлена возможность регулирования режимов технологического процесса обогащения и вакуумного формования органогенной гидромассы и качества формованных изделий на основе изменения значений характеристик гидромассы.

В работе С. Г. Шульдовой представлены результаты исследования математической модели технологического процесса обогащения и вакуумного формования изделий из органогенной гидромассы и предложена методика определения оптимальных параметров этого процесса. Проанализировано влияние режимных и некоторых конструктивных параметров аппаратов,

используемых в технологическом процессе, на его эффективность. Для этого математическая модель адаптирована к действующей на ОАО «Зеленоборское» технологической линии по производству формованных изделий. Структура линии приведена на рис. 1 [3]. На рис. 2 [3] приведена принципиальная технологическая схема линии по производству формованных изделий.

Основные обозначения: V_i – объемы емкостей; C_{gi} – концентрации гидромассы; N_e – мощность гидроразбивателя; N_{mi} – мощности, расходуемые на перемешивание; Q_r , Q_{mi} – циркуляционные расходы в соответствующих емкостях; L_j , D_j – размеры трубопроводов; m_3 , W_3 – масса и влагосодержание заготовок на выходе из формовочной машины; m_c , W_c – масса и влажность изделий после сушки; Δp_b , Q_b , N_b – соответственно разрежение, производительность и мощность вакуум-насоса; Δp_k , Q_k , N_k – то же компрессора; T – температура в сушилке; i – номер перемешивающего устройства; j – номер транспортного участка.

В исследовании С. Г. Шульдовой была разработана математическая модель сложных систем на основе принципа декомпозиции и представлена аддитивной целевой функцией составляющих технологических стадий и системой соотношений, обеспечивающих качество ведения процесса. Формирование математической модели базировалось на выборе основных параметров формовочной машины, поскольку она определяет важнейшую характеристику процесса – производительность по заготовке, которая определяется выражением

$$Q_b = \frac{n_{\phi} \cdot m_3}{t_{\text{ц}}}, \quad (11)$$

где n_{ϕ} – число параллельно работающих форм; $t_{\text{ц}} = t_{\phi} + t_b$ – время цикла их работы; t_{ϕ} – время вакуумного формования; t_b – вспомогательное время.

Для определения времени формования использовано уравнение, полученное на основе балансовых соотношений производительности и зависимости скорости фильтрации от перепада давлений на перегородке.

В результате проведенных исследований была определена эффективность перемешивания гидромассы, которая характеризуется двумя основными факторами: качеством достигаемого результата перемешивания и количеством затрачиваемой энергии. В технологических процессах производства формованных изделий мешальные бассейны предназначены для поддержания и выравнивания концентрации гидросмеси по объему аппарата. Поэтому критерием качества перемешивания было использовано распределение концентрации взвешенных частиц по высоте аппарата.

В результате определения мощности технологических стадий и производительности процесса по формуле (11) было получено следующее выражение целевой функции:

$$E = \frac{t_{\text{ц}}}{n_{\phi} \cdot m_3} \times \left(Q_r \cdot p_{Tr} + M_{kpi} \cdot \omega_{0i} + \Delta p_j + Q_j \cdot \sum_j Q_p \cdot \sum_j \Delta p_p \right) \rightarrow \min, \quad (12)$$

где i – номер мешального устройства; j – номер трубопровода гидромассы; p – номер компрессора или вакуумного насоса.

Исследование влияния характеристик гидромассы на энергетические затраты было проведено для технологического процесса в целом, поскольку установлены взаимозависимости свойств гидромассы и, следовательно, минимизация энергозатрат на отдельном участке процесса может привести к повышению энергоемкости другой технологической стадии.

При выполнении расчетов в качестве исходных данных (массы и влагосодержания заготовки, начальной концентрации гидромассы) использованы значения, полученные в результате обработки экспериментальных данных на ОАО «Зеленоборское», которые приведены в исследованиях С. Г. Шульдовой. В табл. 2 [3] представлены результаты исследования влияния температуры на удельные затраты энергии при перемешивании для концентраций гидромассы $C_{g3} = 1\%$ (мешальные бассейны 3 и 4 (рис. 2)), $C_{g2} = 1,4\%$ (сортировщик волокон 2), $C_{g1} = 2,18\%$ (гидроразбиватель 1).

Таблица 2

Удельные затраты энергии при перемешивании

$T, ^\circ\text{C}$	Удельные затраты энергии, Вт·с/кг		
	$C_{g3} = 1\%$	$C_{g2} = 1,4\%$	$C_{g1} = 2,18\%$
25	3737,8	3740,3	3744,8
30	3660,5	3662,9	3667,4
43	3584,0	3586,4	3590,7
50	3546,0	3548,4	3552,7
60	2286,5	2288,1	2290,8

На основании данных табл. 2 [3] можно сделать вывод о том, что увеличение температуры T до 30°C позволяет снизить удельные затраты мощности на несколько киловатт, изменение температуры T в пределах 30 – 50°C практически не влияет на затраты энергии, тогда как рост температуры до 60°C позволяет существенно уменьшить энергоемкость технологического процесса.

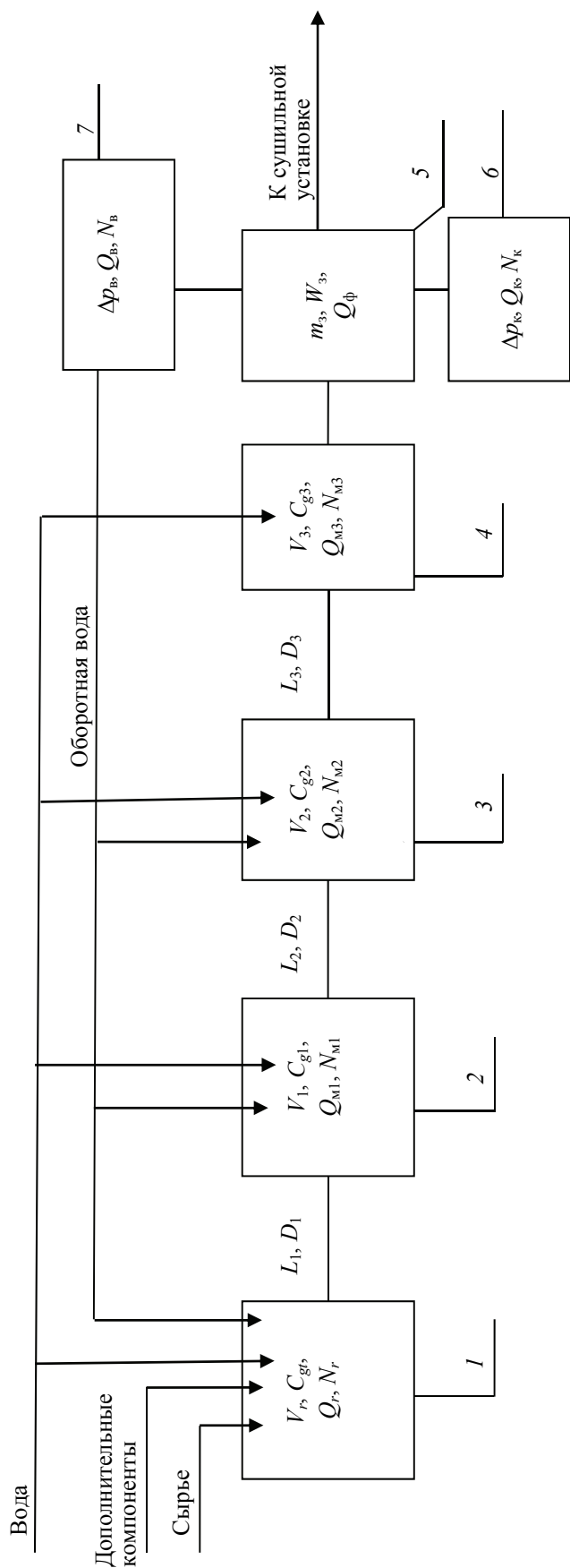


Рис. 1. Структура линии по производству формованных изделий:
 1 – гидроразбиватель; 2, 3 – промежуточные емкости с перемешивающим устройством для гидромассы различной концентрации (мешальные бассейны);
 4 – емкость заданной концентрации гидромассы; 5 – формовочная машина; 6 – компрессор; 7 – вакуум-насос

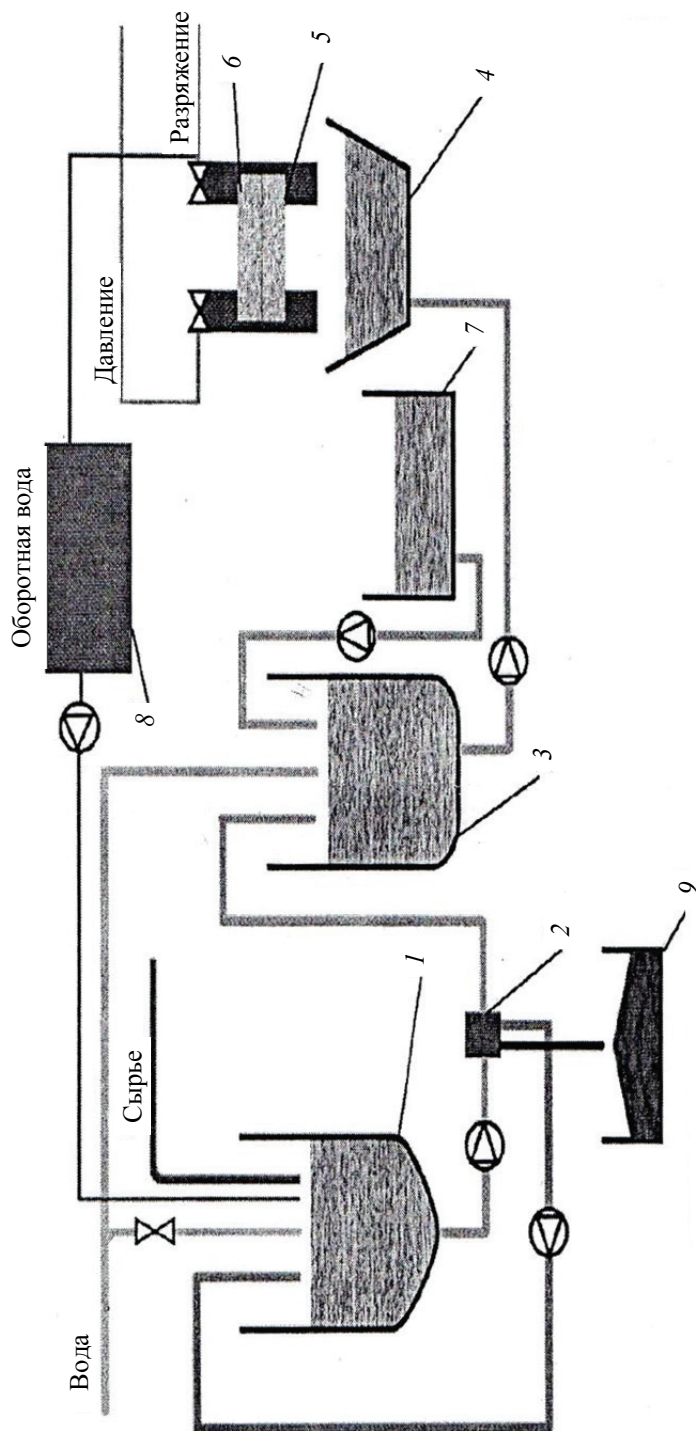


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема линии по производству формованных изделий:

1 – гидроразбиватель; 2 – сортировщик волокон;

3, 4 – промежуточные емкости с перемешивающим устройством (мешальный бассейн – бак формовочной машины);

5, 6 – формы; 7 – емкость для сбора излишков гидромассы;

8 – емкость для сбора фильтрата; 9 – емкость для сбора инородных включений

Заключение. На основании проведенных расчетов и исследований можно сделать вывод о возможности снижения удельных энергетических затрат технологической линии за счет уменьшения начальной концентрации C_{g1} и подогрева гидромассы. Для подогрева воды предложено использовать теплоту, выделяемую сушильной установкой, что не повлечет за собой дополнительных затрат.

Таким образом, предложенная С. Г. Шульдовой математическая модель технологического процесса позволяет проанализировать воз-

можности снижения энергетических затрат за счет изменения характеристик гидромассы, а также некоторых конструктивных и режимных параметров аппаратов и устройств, и может быть использована как для интенсификации существующих, так и при проектировании новых производств. Разработанные методика и рекомендации по расчету режимных параметров технологического процесса производства формованных из гидромассы изделий внедрены на ОАО «Зеленоборское» [3].

Литература

1. Кусков В. Б. Основы обогащения полезных ископаемых (конспект лекций). Санкт-Петербург, 2015 [Электронный ресурс]. URL: <https://studfiles.net/preview/5897584/> (дата обращения: 16.03.2019).
2. Технологические показатели обогащения полезных ископаемых [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pdnr.ru/b10798.html> (дата доступа: 16.03.2019).
3. Шульдова С. Г. Обоснование параметров технологии обогащения и вакуумного формования органогенной гидромассы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.13. Минск, 2012. 23 с.

References

1. Kuskov V. B. *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopayemykh (konspekt lektsiy)* [Basics of mineral processing (lecture notes)]. St. Petersburg, 2015. Available at: <https://studfiles.net/preview/5897584/> (accessed 16.03.2019).
2. *Tekhnologicheskiye pokazateli obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [Mineral Processing Technological Indicators]. Available at: <https://pdnr.ru/b10798.html> (accessed 16.03.2019).
3. Shul'dova S. G. *Obosnovaniye parametrov tekhnologii obogashcheniya i vakuumnogo formovaniya organogennoy gidromassy. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Justification of the parameters of the technology of enrichment and vacuum molding of organogenic hydromass. Abstract of thesis cand. of techn. sci.]. Minsk, 2012. 23 p.

Информация об авторе

Войтов Игорь Витальевич – доктор технических наук, профессор, ректор. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: rector@belstu.by.

Information about the author

Voitau Ihar Vital'evich – DSc (Engineering), Professor, Rector. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rector@belstu.by.

Поступила 25.09.2019