

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики
(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»
(наименование)

18.03.02 Энерго– и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии
и биотехнологии

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Совершенствование технологии синтеза сульфат-нитрата аммония

Обучающийся

Д.О. Коцерь

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Ю.В. Чариков

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)



Тольятти 2023



Росдистант

ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННО

Аннотация

Название выпускной квалификационной работы: «Совершенствование технологии синтеза сульфат-нитрата аммония».

Выпускная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, 5 таблиц, 26 рисунков, списка используемых источников.

В выпускной квалификационной работе рассматривается вопрос предварительной подготовки суспензии сульфата аммония перед отправкой его на синтез.

Целью работы является повышение качества получаемого продукта и снижение энергетических затрат на проведение процесса.

Объектом исследования стадия измельчения и подачи сульфата аммония в отделение синтеза.

Во введении ставится цель и формулируются задачи работы.

В первом разделе рассмотрены свойства сульфат-нитрата аммония, влияние на его свойства процесса измельчения сульфата аммония, проанализированы варианты технологии измельчения и выбрана оптимальная.

Во втором разделе рассмотрена технологическая схема процесса, предложено техническое решение по оптимизации технологии

В третьем разделе приводятся данные по расчетам основного оборудования

В заключении делаются выводы о техническом эффекте оптимизации.

Содержание

Введение.....	5
1 Аналитическая часть.....	6
1.1 Свойства сульфат-нитрата аммония	6
1.2 Технологии производства сульфат-нитрата аммония.....	9
1.3 Анализ возможностей для оптимизации технологического процесса....	11
1.4 Современное состояние технологий измельчения твердых сыпучих материалов	16
2 Технологическая часть	38
2.1 Описание технологической схемы производства.....	38
2.2 Обоснование способа оптимизации процесса измельчения сульфата аммония.....	52
3 Расчетная часть.....	57
3.1 Материальный баланс резервуара смешения.....	57
3.2 Тепловой баланс резервуара смешения.....	58
3.3 Расчет роторно-пульсационного аппарата	61
Заключение	74
Список используемых источников.....	75
Приложение А Технологическая схема отделения концентрирования	79

Введение

Сульфат-нитрат аммония представляет собой важное химическое соединение, которое находит широкое применение в сельском хозяйстве в качестве удобрения. Оно обладает высокой растворимостью в воде и содержит азот и серу – основные элементы, необходимые растениям для здорового роста и развития. «Сульфат-нитрат аммония является источником азота и серы, что делает его эффективным удобрением для многих видов сельскохозяйственных культур»[3].

Производство сульфат-нитрата аммония включает в себя процесс смешения аммиачной селитры и сульфата аммония с последующей грануляцией и осушкой. Технология производства сложна, включает использование широкой номенклатуры оборудования, требует повышенных мер по обеспечению качества воздушной среды, используемой в производственном процессе.

Необходимость совершенствования технологии производства сульфат-нитрата аммония возникает из стремления улучшить производственные процессы сельского хозяйства и повысить эффективность использования удобрений. Оптимизация процесса производства сульфат-нитрата аммония позволит улучшить его качество, снизить энергопотребление, минимизировать потери сырья.

Такой комплексный подход позволяет оценить технологические и экономические аспекты процесса производства сульфат-нитрата аммония и выявить возможности для его оптимизации и улучшения.

Целью работы является снижение энергозатрат на проведение процесса

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать свойства сульфат-нитрата аммония и выявить технологические факторы, влияющие на них;
- выбрать и обосновать способ оптимизации процесса;
- произвести расчеты технологического оборудования.

1 Аналитическая часть

1.1 Свойства сульфат-нитрата аммония

«Аммиачная селитра является самым распространенным в мире и эффективным азотным удобрением. В 2007 г. мировые мощности её производства составляли 43 млн. т в год [1]. Она используется в сельском хозяйстве под все виды культур и на любых типах почв. Но у неё есть один очень серьезный недостаток – это её взрывоопасность. Поэтому перед производителями аммиачной селитры стоит актуальная задача обеспечить переход на выпуск удобрений на базе селитры, сохраняющих агрохимическую эффективность, с существенно большей устойчивостью к внешним воздействиям и, соответственно, меньшей взрывоопасностью. В качестве веществ добавок, снижающих уровень потенциальной опасности аммиачной селитры, используются:

- карбонатсодержащие соединения природного и техногенного происхождения (мел, карбонат кальция, доломит);
- калийсодержащие вещества (хлористый калий, сульфат калия);
- вещества, содержащие одноименный катион – аммоний: сульфат аммония, орто- и полифосфаты аммония;
- прочие балластные вещества, не несущие полезной нагрузки, а определяющие только механическое разбавление аммиачной селитры (гипс, фосфогипс и прочие) [2].

Одним из вариантов является организация производства NS-удобрений на основе нитрата и сульфата аммония. Наблюдаемое в последнее время возрастающее обеднение почв серой повышает потребность в таких серосодержащих удобрениях. Впервые механическую смесь, а также сплав нитрата аммония с сульфатом аммония стали изготавливать в Германии [3]. Преимуществами этого вида удобрения (по сравнению с составляющими его компонентами) являются: меньшая гигроскопичность сравнению с

аммиачной селитрой, большее содержание азота сравнению с сульфатом аммония и уменьшение расхода «балластной» серной кислоты на единицу азота по сравнению с расходом в производстве сульфата аммония. Чем выше содержание в сульфатнитрате сульфата аммония, тем меньше его гигроскопичность, слеживаемость и взрывоопасность. Об уменьшении взрывоопасности аммиачной селитры в присутствии сульфата аммония говорят работы» [4-6]. В работе [4] исследовано влияние ионов хлора, сульфата и нитрита на разложение нитрата аммония в сильноокислом водном растворе при температуре его кипения. Обнаружено, что ионы сульфата не проявляют каталитической активности при разложении NH_4NO_3 в отличие от ионов хлора, которые делают возможным быстрое разложение NH_4NO_3 на N_2O и H_2O . В работе [5] нитрат аммония модифицирован химическими удобрениями, в частности $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, K_2SO_4 и NH_4Cl , а затем смешан с жидким топливом и древесными опилками для получения взрывчатых веществ. Установлено, что детонация взрывчатых веществ не начинается в присутствии 25 % $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ в модифицированном NH_4NO_3 .

«При смешении или сплавлении сульфата с нитратом аммония образуется двойная соль $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{NH}_4\text{NO}_3$, содержащая примесь избыточного компонента (сульфата или нитрата).

На рисунке даны изотермы растворимости в системе NH_4NO_3 -- $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ - H_2O при 0, 30, 70 и 100°C.

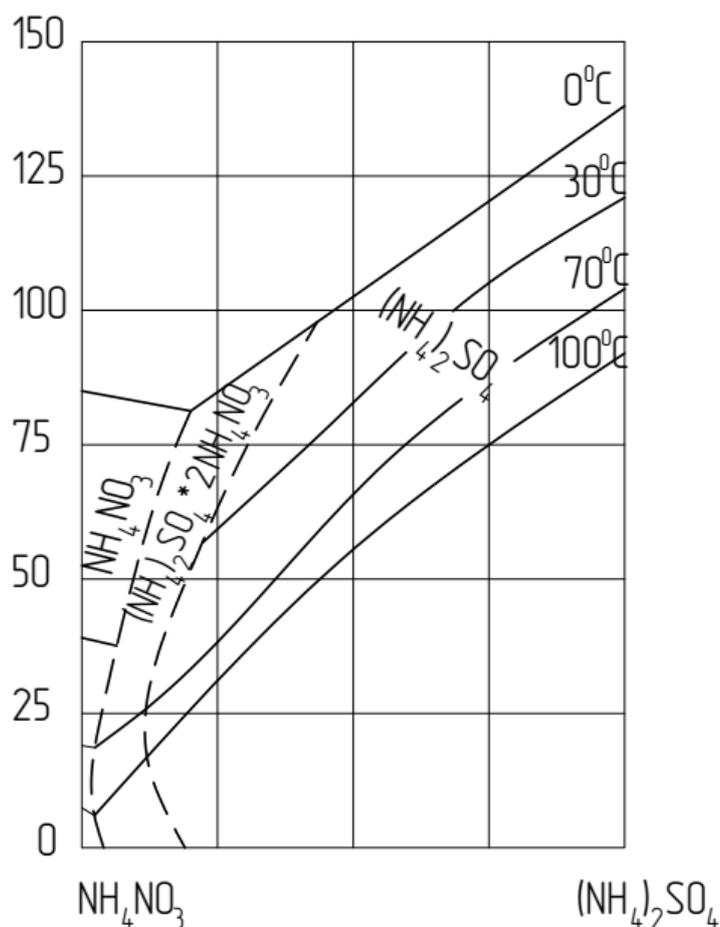


Рисунок 1 – Изотермы растворимости в тройной системе нитрат аммония-сульфат аммония-двойная соль

Пунктирные линии отделяют области существования отдельных солей и двойной соли. Так как система трехкомпонентная, то при условии ее инвариантности наибольшее число фаз в ней может быть равно пяти, из которых три – твердые. Следовательно, все три твердые фазы в присутствии жидкой и парообразной фаз могут существовать одновременно лишь при определенной температуре, концентрации и давлении. Как видно из диаграммы, эта температура не находится в пределах от 0 до 100°C. В этом интервале температур в присутствии жидкой фазы совместно могут существовать только две твердые фазы: нитрат аммония и сульфат-нитрат и сульфат аммония и сульфат-нитрат.

Механическая прочность сульфат-нитрата в широком диапазоне мольных соотношений (от 3:97 до 40:60) превышает прочность модифицированной аммиачной селитры в 2-5 раз» [9].

«Явление слёживаемости для сульфат-нитрата проявляется менее выражено, чем для модифицированной соединениями магния аммиачной селитры»[4]. Так гранулы аммиачной селитры теряют форму и комкуются при содержании внутренней влаги свыше 3,5%. В то время как гранулы сульфат-нитрата сохраняют внешний вид и технологические свойства при влажности не более 6-7%. При этом содержание питательных веществ в сульфат-нитрате в пересчете на азот и серу находится в пределах 35-38%.

Таким образом, по комплексу свойств сульфат-нитрат аммония является наиболее предпочтительным с точки зрения технологии хранения и применения в сельском хозяйстве и экономически привлекательным азотносерным удобрением.

1.2 Технологии производства сульфат-нитрата аммония

«Первоначально сульфат-нитрат аммония промышленно изготавливался за счет простого смешения составляющих компонентов. Полученный продукт, содержал до 65% сульфата аммония и до 35% нитрата аммония. Технологический процесс производства заключался в сочетании процессов дробления и классификации крупных кристаллов отдельных сырьевых компонентов, разделному нагреву сульфата аммония до 120°C и нитрата аммония до 60°C, и дальнейшему механическому перемешиванию.

Более совершенным способом получения сульфат- нитрата аммония является смешение сухого сульфата аммония с 83% раствором нитрата аммония. Смешение производят в шнековых аппаратах, из которых выходит масса с содержанием около 6 % влаги. Эта масса измельчается между двумя чугунными валами с шипами, высушивается до влажности 0,1-0,2 % в барабанной сушилке и рассеивается. Фракция с величиной кусков больше 4

мм подвергается размолу и возвращается на сито, а фракция с частицами менее 0,8 мм возвращается в смеситель. Можно получить сульфат-нитрат аммония нейтрализацией смеси серной и азотной кислот. В реактор-сатуратор, снабженный мешалкой, одновременно подают 50%-ную азотную кислоту, 68%-ную серную кислоту и аммиак. Вследствие экзотермичности реакции нейтрализации температура в сатураторе достигает 150°C и тепла хватает для испарения воды, вводимой с кислотами. Отходящие из сатуратора газы (аммиак) и пары воды поступают в ректификационную колонну, откуда аммиак возвращается в сатуратор. Непрерывно вытекающий из реактора плав содержит 2,5-3% свободной кислоты. Избыточная кислотность плава снижается до 0,1-0,3% введением в него аммиака в донейтрализаторе. Из донейтрализатора плав, содержащий 97-98% сухой соли и 2-3% влаги, направляют на кристаллизацию. Кристаллизацию осуществляют на поверхности охлаждающего барабана» [22].

«В настоящее время осваивается производство сложного удобрения азотосульфата NS 32 : 5 (нитрат аммония с добавкой 21% сульфата аммония). Это соответствует мольному соотношению $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 : \text{NH}_4\text{NO}_3 = 1 : 6$ [10]. Это новое серосодержащее азотное удобрение не уступает, а в некоторых случаях превосходит стандартные формы азотных удобрений по влиянию на урожайность и качество зерна яровой пшеницы. Азот этого удобрения лучше поглощается растениями, коэффициент его использования больше на 21%, а вымывание азота из почвы меньше по сравнению с аммиачной селитрой [11, 12]. В работе [10] было показано, что введение сульфат-анионов в виде сульфата аммония в расплав нитрата аммония приводит к снижению начальной скорости термического разложения нитрата аммония и отсутствию увеличения скорости разложения по ходу процесса по сравнению с кинетическими закономерностями разложения чистого нитрата аммония. Наблюдаемый эффект связан со снижением концентрации молекулярной азотной кислоты в расплаве за счёт её ионизации сульфат-анионом. При одинаковых внешних условиях взрывобезопасность

высокотемпературной переработки сложных удобрений на основе смесей нитрата и сульфата аммония выше, чем для нитрата аммония, выпускаемого в качестве удобрения» [17].

Современное производства сульфат нитрата аммония включает в себя стадии подготовки сырьевых компонентов, смешения, синтеза, выпаривания, гранулирования, обработки гранул и сушки, а также вспомогательные процессы регенерации сырья, очистки воздуха.

1.3 Анализ возможностей для оптимизации технологического процесса

«Сульфат нитрат аммония является одним из первых промышленно освоенных синтетических удобрений, и находится в непрерывном использовании в течение почти 100 лет, обеспечивая растения важными первичными и вторичными питательными веществами, азотом и серой. Обеспечение азотом частично происходит через нитратный ион, что является желательным, поскольку он легко адсорбируется многими растениями, промотируя их рост на ранней стадии. Исторически сложилось, что термин "сульфат нитрат аммония" не относится к конкретному химическому соединению, содержащему элементы в закрепленных соотношениях. Скорее его использовали для того, чтобы описать различные смеси сульфата аммония и нитрата аммония

Из уровня техники становится ясным, что полученный в промышленных условиях по общепринятым технологиям сульфат-нитрат аммония характеризуется низкой устойчивостью к разрушению, склонностью к адсорбции влаги и слеживанию». Ряд патентов посвящены модификации состава удобрения различными добавками, устраняющими негативные свойства конечного продукта.

Патент [1] описывает способы придания сульфат-нитрату аммония устойчивости при хранении. Возможность устранения склонности к

слёживанию путем добавления амфотерных оксидов металлов, солей железа, магния, кальция, фанолита и других минералов, карбамида позволяет снизить склонность к слеживанию и гигроскопичность, повысить механическую прочность частиц.

Также описаны способы повышения устойчивости сульфат-нитрата аммония к детонации и воспламенению [4], путем ограничения гранулометрического состава продукта и количественного соотношения компонентов в него входящих.

Например, известен способ получения сульфат-нитрата аммония с различным мольным соотношением компонентов позволяющий за счет соблюдения определенного температурного режима процесса синтеза и грануляции и соотношения сырьевых компонентов добиться получения невзрывоопасного продукта требуемого гранулометрического состава.

В ряде патентов приведены способы получения непосредственно двойной соли сульфат-нитрата аммония с улучшенными потребительскими свойствами. Их анализ позволит обосновать выбор способа оптимизации процесса.

По способу, представленному в патенте [5], можно получить безопасный продукт, с невыраженными гигроскопическими свойствами путем проведения ряда последовательных технологических стадий. Особенный эффект достигается благодаря тому, что пульпа, представляющая из себя суспензию расплава сырьевых компонентов, отверждается в кипящем слое аппарата грануляции при температурах 90-120 °С. Полученный продукт содержит в основном двойную соль сульфат-нитрата аммония и не более 7% масс. свободного нитрата.

Способ, описанный в патенте [2], позволяет получить продукт с высокой стабильностью против детонации, повышенной плотностью и пониженной гигроскопичностью, благодаря высокой скорости охлаждения реакционной массы при реализации процесса кристаллизации, что позволяет предотвратить макроскопическое выделение продуктов реакции.

В патенте [3] описан состав товарного сульфат-нитрата аммония и способ его получения, включающий загрузку сырьевых компонентов в устройство для плавления, непосредственно плавление, химическое взаимодействие сырьевых компонентов в интервале температур 180 -210°C, отвержение полученного продукта со скоростью 100°C/мин. Выдерживание заявленных параметров процесса позволяет получить продукт требуемого строения, что обеспечивает повышенные потребительские свойства.

В патенте [6] представлен способ получения сульфатонитрата аммония, включающий смешение кристаллов сульфата аммония с раствором нитрата, с добавкой щелочи при температурах 100-170°C. Далее проводят гранулирование и сушку при температурах 160-220°C. Контролируется содержание воды в реакционной массе и готовом продукте. Техническим результатом является снижение слеживаемости продукта в 3-5 раз.

Таким образом, из современного уровня развития техники касательно процесса получения сульфат-нитрата аммония можно сделать следующие выводы. Основными свойствами, определяющими качество сульфат-нитрата аммония как минерального удобрения являются гигроскопичность, невзрывоопасность и механические свойства. Их высокие показатели зависят от состава исходного сырья, соблюдения определенных норм технологического режима и аппаратурного оформления процесса. Возможными путями оптимизации процесса являются: совершенствование процессов подготовки исходного сырья, применение модифицирующих добавок, обеспечение высокой скорости кристаллизации продукта, совершенствование мер поддержания теплового режима отдельных стадий процесса.

Выберем в качестве направления оптимизации подготовку сырья. Ключевыми параметрами качества сырья является содержание основного вещества и гранулометрический состав.

В рассматриваемом объекте в качестве сырья используются товарные минеральные удобрения – нитрат аммония и сульфат аммония. Соответственно состав сырья находится на достаточном уровне.

С точки зрения оптимальности состава сырья можно отметить, что размер частиц нитрата аммония не является критическим, но предпочтительно диаметр 95%масс. частиц не должен превышать 3мм, что соответствует показателям качества потребляемого сырья.

Потребляемый сульфат аммония выпускается ПАО «Куйбышевазот» как товарное минеральное удобрение согласно ТУ 2181-060-00205311-2014. Основное количество кристаллов имеют диаметр от 2 до 5 мм. Это показатель определяется технологическим процессом применения сульфата аммония как минерального удобрения в сельском хозяйстве.

Размер частиц сульфата аммония важен для достижения высоких показателей качества конечного продукта. Как правило, чем меньше частица, тем более высока скорость реакции между сульфатом аммония и нитратом аммония и более высокой будет степень их дисперсии. Предпочтительно, чтобы, по крайней мере, около 85 масс. % сульфата аммония имело диаметр менее 0,30 мм. Сульфат аммония, подвергнутый размолу на шаровой мельнице, обычно соответствует этому критерию без дополнительного просеивания. Но более предпочтительно, чтобы около 99 масс. % сульфата аммония имело диаметр менее 0,3мм, при этом 50% масс. имело диаметр менее 0,074 мм. Для измельчения в рассматриваемом процессе используется валковая мельница. Ее применение обеспечивает доведение до нужного размера(0,3мм) не более 85%масс частиц. Процесс ведется в сухом состоянии, что ведет к затратам на транспортировку и очистку воздуха в зоне транспортировки и измельчения. Измельченные кристаллы отправляются на приготовление суспензии. Более высоких результатов с точки зрения эксплуатационных затрат и качественных показателей частиц позволяет достичь использование мокрого измельчения с использованием роторно-пульсационных аппаратов.

Вода помимо роли дисперсионной среды процесса измельчения играет важную роль в процессе синтеза.

«Вода является существенным компонентом реакционной смеси, так как влияет на содержание целевых двойных солей в конечном продукте. Так резкое изменение в соотношениях 1:2 и 1:3 двойных солей в продукте происходит, когда содержание воды в загрузке сырья превышает около 2 масс. %. Когда воды становится меньше чем 2 масс. % от загруженного сырья, формируется более опасная двойная соль 1:3, в предпочтении более желательной двойной соли 1:2, и остается большее количество непрореагировавших остатков нитрата аммония. Предпочтительно, чтобы содержание воды было в диапазоне от 2 до 5% масс. от объема загрузки сырья.

Способ, при котором вода загружается в реакционную смесь, не является критическим. Вода может быть загружена в виде жидкости, или она может быть включена в сульфат аммония, нитрат аммония или в них обоих в виде адсорбированной влаги.

Остаточная вода в продукте после расплавления и охлаждения пропорциональна исходному количеству воды даже при том, что в некоторых примерах расплавление было проведено при температуре 200 °С в течение более часа с перемешиванием. Концентрация остаточной воды также была удивительно высока, учитывая, высокое давление водяного пара при температуре 200 °С. Большая часть добавленной воды, вероятно, быстро испаряется, однако конечные соотношения двойных солей сильно связаны с концентрацией воды, оставшейся в продукте. Также плотность продукта увеличивается при увеличении количества остаточной воды.

Сульфат аммония, находящийся в равномолярной смеси сульфата аммония и нитрата аммония, является не полностью растворимым в расплавленном нитрате аммония в отсутствии воды. Когда воду добавляют в загрузку, предполагается, что растворимость сульфата аммония в расплавленном нитрате аммония увеличивается, таким образом, способствуя

завершению реакции нитрата аммония с сульфатом аммония и формированию двойной соли 1:2» [16].

Для достижения высоких потребительских свойств сульфат-нитрата сульфат аммония должен быть измельчен достаточно тонко и максимально полно.

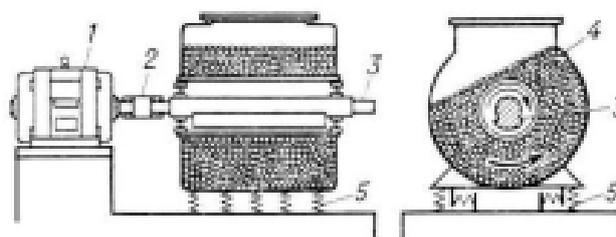
1.4 Современное состояние технологий измельчения твердых сыпучих материалов

Существующие способы измельчения материалов и используемые для этого устройства очень разнообразны и многочисленны [98, 112]. Однако только небольшая часть данных устройств предназначена для мелкодисперсного измельчения. Обычно для этого используют специальные аппараты, которые являются комплексной системой мельниц и сепаратора [103]. Сепаратор обеспечивает выделение необходимой тонкой фракции и возвращение на домол более грубой. Такие аппараты с мельницами и дополнительными классификаторами различаются по конкретным видам обрабатываемых материалов и дисперсности конечного продукта. Применимость их для конкретной цели обуславливается плотностью, абразивностью, влажностью, склонностью к образованию агрегатов и слипаемостью обрабатываемых материалов [1].

«В результате проведенного аналитического обзора существующих конструкций для мелкодисперсного измельчения материалов выделим наиболее приемлемые группы машин и механизмов: мельницы, ротационные аппараты и роторные аппараты с периодическим прерыванием потока обрабатываемой среды. Рассмотрим более подробно представителей каждой обозначенной группы. Для мелкодисперсного измельчения материалов обычно применяют следующие типы мельниц: вибрационные, планетарные шаровые, и дезинтеграторные. Диапазон дисперсности и экономичность работы таких мельниц зависят от целого ряда факторов. К таким факторам в

общем случае относятся материалы стенок и мелющих тел, размеры и количество шаров, частота и амплитуда колебаний. В настоящее время нет универсальной мельницы, которая могла бы во всех случаях эффективно заменить все другие даже для такой узкой области дисперсности. По этой причине для научно-исследовательской работы или технологических целей специально выбирают мельницы с учетом конкретных свойств измельчаемого материала и требований к условиям его применения. Вибрационные мельницы предназначены для очень тонкого и сверхтонкого измельчения. Недостатком является то, что измельчаемый в них материал загрязняется продуктом износа мелющих тел. Дезинтеграторы пригодны для измельчения только сравнительно мягких материалов, абразивность которых достаточно мала. Планетарные мельницы лишены многих недостатков присущих перечисленным выше аппаратам и используются для сверхтонкого измельчения и диспергирования материалов» [29].

Принцип действия вибрационных мельниц основан на приведении массы шаров и измельчаемого материала в круговое колебательное движение посредством вибратора, сопряженного с электродвигателем. Частицы материала, попадая в пространство между шарами, разрушаются. Устройство мельницы показано на рисунке 2.

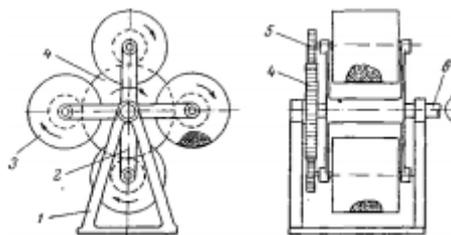


1 – электродвигатель; 2 – эластичная муфта; 3 – вал с дебалансом; 4 – барабан; 5 – пружины

Рисунок 2 – Схема вибрационной мельницы с внутренним вибратором

«Колебательные импульсы шара и траектория его движения в помольной камере имеют сложную форму, зависящую от положения шара по отношению к корпусу. Усилия в активной зоне каждого шара, возникающие в процессе колебаний, также определяются его положением, массой всех мелющих тел и условиями взаимодействия шаров. В силу всего этого расчет и измерение напряжений в активной зоне не представляются возможными.

Планетарные мельницы, изображенные на рисунке 3 представляют собой устройства механической обработки материала с последующим его сверхтонким измельчением и превращением в ультрадисперсный порошок, размеры частиц которого достигают наноразмерности» [15].

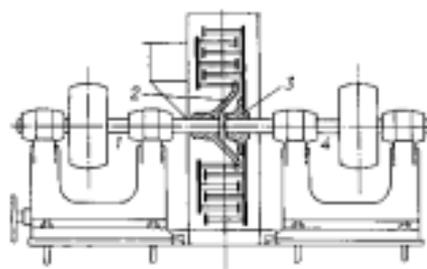


1 – станина; 2 – водило; 3 – барабанная мельница; 4 – неподвижное зубчатое колесо; 5 – приводная шестерня; 6 – ведущий вал

Рисунок 3 – Планетарная шаровая мельница

«Планетарная шаровая мельница представляет собой несколько небольших барабанных измельчителей 3, смонтированных на вертикальном водиле 2. На оси каждого измельчителя насажены шестерни 5, которые находятся в зацеплении с неподвижными зубчатыми колесами 4. При вращении водила барабанные измельчители вращаются как относительно его оси, так и собственных осей. Находящиеся в барабанах шары приобретают сложное движение и при взаимном столкновении со стенкой барабана и друг с другом измельчают материал. Скорость вращения барабанов вокруг центральной оси определяет ускорение центробежного поля, которое может в десятки, даже сотри раз превосходить ускорения гравитационного поля. Характер воздействия мелющих тел на материал, истирающий, ударный и

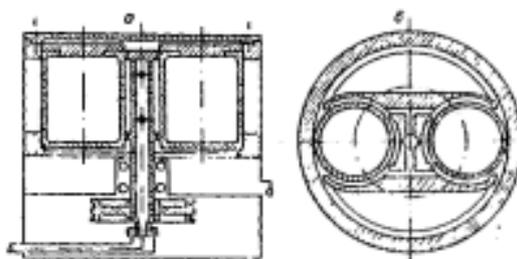
смешанный, позволяет регулировать второй параметр. Данная особенность планетарных мельниц дает высокую эффективность при измельчении любых по твердости материалов. Технология планетарных мельниц позволяет осуществить процесс измельчения за 10 – 30 минут, на что традиционное оборудование тратит десятки часов. Производят планетарные мельницы промышленного типа, которые используют ускорение 20 – 25 G, а лабораторные установки способны достигать 30 – 110 G. В процессе переработки материала с использованием описанной технологии достигается желаемый размер частиц и эффект механической активации. Обработка материалов в планетарных мельницах позволяет не только вскрывать руды и материалы, но и получать наноразмерный порошок, осуществлять процессы механического сплавления. Дезинтеграторные мельницы или дезинтеграторы (рисунок 4) относятся к числу машин ударного действия. Однако измельчение в них производится ударом вращающихся бил по свободно падающим частицам материала. Дезинтегратор содержит в своем кожухе два вращающихся навстречу один другому диска с насаженными с внутренней стороны по окружности рядами бил цилиндрической (иногда конической или призматической) формы. Ряды бил обоих дисков расположены на разных радиусах вращения и входят с некоторым зазором один в другой. Мельницы с одним вращающимся ротором называются дисмембраторами. Их преимуществом является сравнительно простое конструктивное оформление. Вместе с тем для достижения тех же, что и в дезинтеграторах, скоростей удара бил о частицы необходимо обеспечить соответственно большие скорости вращения диска» [11].



1, 4 – валы; 2, 3 - роторы с пальцами

Рисунок 4 – Схема дезинтегратора.

«Измельчаемый материал поступает в центральную часть барабана дезинтегратора. Частицы, проходя через ряды движущихся бил, подвергаются их ударам и по мере перемещения к периферии становятся все мельче. Измельченный продукт либо высыпается через донный люк, либо выносятся потоком воздуха в классификатор. Степень измельчения материала в дезинтеграторе определяется скоростью вращения дисков, их диаметром, числом рядов, расположением и размерами бил [20]. Поскольку имеющиеся конструкции планетарных и дифференциальных мельниц не удовлетворяли высокоэнергетическим требованиям (отсутствие термостатирования и герметизации), была разработана конструкция, учитывающая эти требования. Измельчительный аппарат рассматривали как химический реактор и принимали соответствующие меры, чтобы свести к минимуму мешающие факторы: термостатировали рабочие емкости, изолировали обрабатываемое вещество от внешней атмосферы и использовали химически инертные материалы» [13].



а – вид сбоку, б – вид сверху

Рисунок 5 – Планетарная мельница с гидростатическими обоймами.

«На рисунке 5 представлена конструкция планетарной мельницы с барабанами в обоймах, в которые под давлением подается вода, прижимающая барабаны к стенке и выполняющая роль смазки и охлаждающей среды. Планетарная мельница с термостатированным барабаном представлена на рисунке 6. В отличие от существующих аппаратов с целью обеспечения герметизации и термостатирования рабочих емкостей вращающаяся емкость с загрузочными устройствами устанавливается под углом к общей оси вращения, а загрузочное устройство снабжено гибкими шлангами и двумя пальцами, движущимися в пазах втулки, жестко установленной на станине» [9].

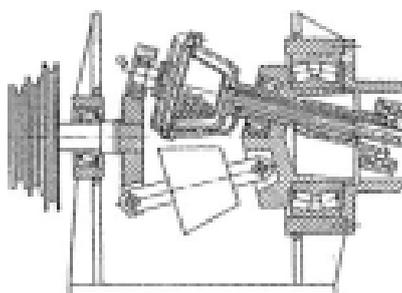
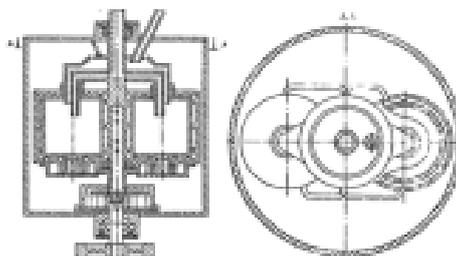


Рисунок 6 – Горизонтальный вариант планетарной мельницы с термостатированным барабаном

«При вращении ротора рабочая емкость в результате кинематической связи со станиной, осуществляемой пальцами, движущимися в пазах втулки, совершает планетарное движение. Последнее складывается из кругового движения наклонной собственной оси емкости, но конусной поверхности вокруг оси ротора и собственного вращения емкости относительно ротора вокруг наклонной собственной оси. При такой конструкции аппарата все параметры планетарной мельницы в нем сохраняются. Энергетические параметры активации в данном аппарате можно варьировать в широких интервалах путем изменения частоты вращения рабочей емкости вокруг общей оси. Поскольку частота вращения вокруг планетарной оси равна частоте вращения вокруг общей оси, режим движения загрузки в барабане мельницы при этом является неизменным. К параметрам, оказывающим влияние на эффективность диспергирования и активации, относятся также плотность и размер шаров, объем, заполняемый шарами, соотношение массы шаров и массы обрабатываемого вещества.

Дифференциальная мельница с гидравлическим приводом (рисунок 7) предоставляет большую возможность для оптимизации процесса диспергирования, чем планетарная, так как и отличие от нее позволяет изменять рабочие параметры в широком интервале значений» [16].

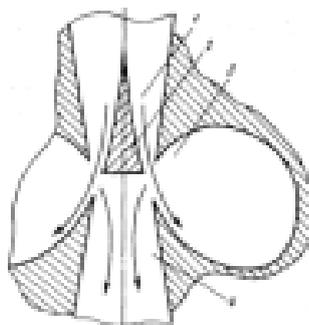


а – вид сбоку, б – вид сверху

Рисунок 7 – Дифференциальная мельница с гидравлическим приводом.

«Чтобы частота вращения барабана вокруг планетарной оси отличалась от частоты вращения вокруг общей оси, необходимы относительно сложные механические системы. С целью упрощения системы конструкция дифференциальной центробежной мельницы сконструирована так, что барабаны приводятся во вращение вокруг своей оси гидродвигателем с ротором, закрепленным на барабане. Общее центральное вращение осуществляется обычным способом или также с помощью гидродвигателя. Жидкость, которая обеспечивает работу гидродвигателей, служит, кроме того, охлаждающей и смазывающей средой. В результате снижаются энергопотери на трение, и повышается эффективность диспергирования и активации» [10].

В ротационных аппаратах вращательное движение обрабатываемой среды и ее периодическое прерывание происходит без движущихся элементов, а только за счет его конструктивных особенностей. Представителем данной группы является вихревой диспергатор представленный на рисунке 8.



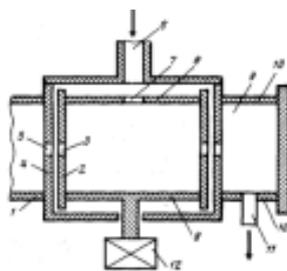
1 – входное отверстие; 2 – рассекаТЕЛЬ потока обрабатываемой среды; 3 – вихревая камера; 4 – выходное отверстие

Рисунок 8 – Вихревой ротационный диспергатор.

Аппарат работает следующим образом. Обрабатываемая среда подаётся под достаточным внешним давлением во входное отверстие

диспергатора. Далее поток попадает на периферию вихревой камеры, двигаясь по которой, направляется к выходу из входного отверстия. Здесь поток, вышедший из вихревой камеры, «перерезает» входной поток, препятствуя ему некоторое время до тех пор, пока давление входного потока не достигнет критической величины, после которой движение входного потока возобновляется. После этого картина повторяется. Частота прерывания потока определяется, главным образом, геометрическими параметрами аппарата. Положительным последствием прерывания является генерация отрицательных импульсов давления и возбуждение кавитации. Роторно-вихревой аппарат, представленный на рисунке 9, объединяет в себе идеи генерации переменных гидрометрических полей за счет прерывания потока, как за счет динамического прерывания, так и за счет статического (ротационно-вихревого) механизма.

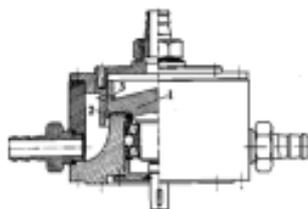
«Представителем последней из рассматриваемых групп конструкций для осуществления мелкодисперсного способа измельчения материалов являются роторные аппараты с периодическим прерыванием потока обрабатываемой среды. Одним из важнейших факторов интенсификации процессов помола является резонанс. Первым роторным аппаратом с резонансным способом интенсификации процессов был аппарат, в котором отношение радиуса внутренней поверхности рабочей камеры к радиусу внешней поверхности ротора составляло 1,83. Роторный аппарат, представленный на рисунке 9, позволяет использовать интенсифицирующие возможности не только радиального резонанса, но и продольного за счет того, что торцы корпуса и торцы ротора выполнены с возможностью осевого перемещения для настройки на определенную собственную частоту колебаний» [7].



1 – корпус; 2 – ротор с отверстиями 3; 4 – статор с отверстиями 5; 6 – входной патрубок; 7 – входное отверстие; 8, 10 – торцы камеры и ротора; 9 – рабочая камера; 11 – выходной патрубок; 12 – привод

Рисунок 9 – Роторный аппарат радиального и продольного резонанса.

Роторный аппарат модуляции потоков, представленный на рисунке 10, представляет собой жидкостной смеситель с сиреной роторного типа, в котором сырье подвергается механическому, акустическому и гидродинамическому воздействиям.



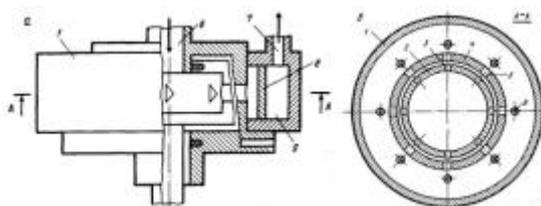
1 – ротор; 2 – статор; 3 – отверстия

Рисунок 10 – Роторный аппарат модуляции потоков.

«Принцип действия аппарата заключается в том, что при его работе поток смеси перерабатываемого материала и жидкости дробится ротором на ряд мелких вторичных потоков, которые поступают в зазор между ротором и статором и дробятся на более мелкие потоки. Протекая через многочисленные быстро сменяющиеся узкие проходы, созданные отверстиями в роторе и статоре, обрабатываемый материал подвергается механическому, акустическому и гидродинамическому воздействиям.

Механическое разрушение возникает при ударе частиц о боковые поверхности отверстий ротора и статора. Разрушение при пульсации давления происходит вследствие резкого изменения направления потоков. Так же имеет место разрушение силами взаимного трения [8].

Для повышения эффективности кавитационного воздействия на технологический процесс применяется роторный аппарат, представленный на рисунке рисунок 11, с отверстиями ротора и статора, поперечные сечения которых имеют одинаковую форму. При этом основания отверстий ротора параллельны основанию отверстий статора» [20].

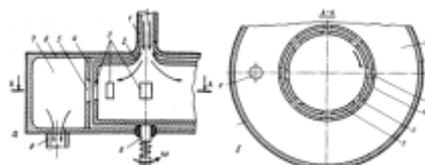


а – продольный; б – поперечный разрез; 1 – корпус; 2 – ротор с отверстиями 3; 4 – статор с отверстиями 5; 6 – входной; 7 – выходной патрубков; 8 – кавитационные стержни; 9 – рабочая камера

Рисунок 11 – Роторный аппарат с одинаковой формой отверстий статора и ротора.

«Проходное сечение с некоторого момента времени при треугольной форме отверстий начинает уменьшаться, а скорость обрабатываемой среды еще некоторое время по инерции нарастает. Используемый в данном аппарате способ выполнения отверстий ротора и статора и их расположение по отношению к направлению вращения ротора позволяет генерировать более глубокие отрицательные импульсы при тех же скоростях вращения ротора и том же перепаде давления между полостью ротора и рабочей камерой, либо такой же импульс, что и в случае прямоугольных отверстий,

но при существенно меньших значениях скорости и перепада давления. Роторный кавитационный реактивный диспергатор конструктивно выполнен с не радиальными отверстиями ротора и статора, а вал привода ротора изготовлен упругим в окружном направлении. Конструкция аппарата представлена на рисунке 12.

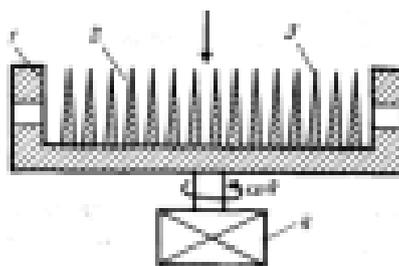


1 – входной патрубок; 2 – ротор с отверстиями 3; 4 – статор с отверстиями 5; 6 – корпус; 7 – рабочая камера; 8 – выходной патрубок; 9 – привод

Рисунок 12 – Роторный кавитационный реактивный диспергатор.

Когда отверстия ротора по мере вращения ротора приближаются к соответствующим отверстиям статора, скорость обрабатываемой среды в отверстиях ротора и статора нарастает несколько медленнее, чем в аппарате с радиальными отверстиями ротора и статора и неупругим валом, так как реактивная сила, обусловленная не радиальностью отверстий, несколько притормаживает вращение ротора, а потенциальная энергия вала привода запасается. Когда отверстия расходятся, реактивный эффект ослабевает, потенциальная энергия вала возвращается ротору и поэтому заключительная фаза процесса течения занимает меньшее время, спад скорости происходит резче, и глубина генерируемого отрицательного импульса возрастает» [23].

«Одним из способов повышения диспергирующей способности роторного аппарата на этапе обработки смесей является выполнение на внутренней торцевой поверхности ротора игольчатых элементов. Конструкция аппарата представлена на рисунке 13.

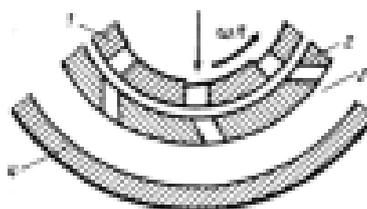


1 – корпус; 2 – рабочая камера; 3 – иглы; 4 – привод

Рисунок 13 – Роторный аппарат с игольчатыми элементами.

Обрабатываемая среда в таком аппарате, подаваемая с помощью насоса в полость вращающегося ротора, разбиваясь об острия игл, подвергается при этом более интенсивному перемешиванию и измельчению.

Другой модификацией полости ротора является выполнение его внутренней поверхности зубчатой в виде клиновидных лопаток. Конструкция аппарата представлена на рисунке 14. Боковая грань лопаток при этом является продолжением задней стенки отверстий ротора по ходу его вращения, а основания второй совпадают с передней стенкой следующих по ходу отверстий ротора» [14].

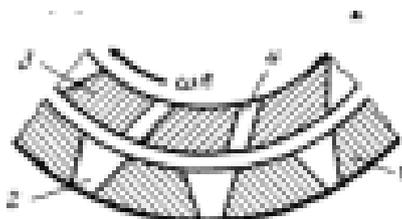


1 – ротор; 2 – статор; 3 – рабочая камера; 4 – корпус

Рисунок 14 – Роторный аппарат с клиновидными лопатками на внутренней боковой поверхности ротора.

«Преимуществом клиновидных лопаток перед обычными рифлениями, являющимися правильными рядами углублений и выступов, а также волнообразной поверхностью, является то, что они позволяют в процессе их обтекания обрабатываемой средой в значительной степени воздействовать на проходящие в аппарате процессы диспергирования. Роль рифлений предлагаемой формы в интенсификации процесса диспергирования заключается в том, что клиновидный профиль выступов способствует как образованию области повышенного давления, увеличивающей скорость течения жидкости, так и увеличению степени турбулизации потока за счет увеличения диссипации мощности.

Интенсификации процесса сверхтонкого измельчения или диспергирования компонентов обрабатываемой среды вследствие турбулизации течения способствует выполнению каждого отверстия статора в виде конфузора, а отверстия ротора – в виде отверстия, ось которого параллельна одной из сторон конфузора»[12]. Конструкция устройства представлена на рисунке 15.



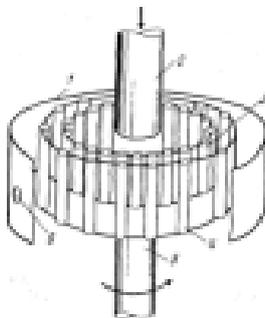
1 – статор; 2 – отверстие статора; 3 – ротор; 4 – отверстие ротора

Рисунок 15 – Роторный аппарат с отверстиями статора и ротора в виде конфузора

«Поскольку в процессе движения отверстий ротора и статора отверстие ротора параллельно ближайшей к отверстию ротора стороне выполненного в виде конфузора отверстия статора, то движущаяся из полости ротора в рабочую камеру обрабатываемая среда испытывает относительно малое

гидравлическое сопротивление. Для повышения эффективности процессов сверхтонкого измельчения или диспергирования в аппарате с конфузор-диффузорными отверстиями ротора и статора, вход каждого такого отверстия и выход соединён упругими мембранами, как показано на рисунке 16, при этом стенки отверстий становятся эластичными.

Интересной является конструкция гидромеханического диспергатора, боковые стенки ротора и статора, которого выполнены в виде рядов аксиальных стержней, отстоящих друг от друга на расстоянии, равном их диаметру.

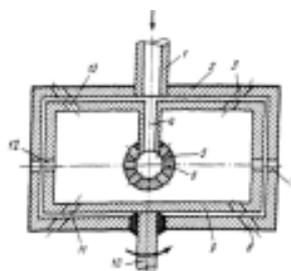


1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – ротор; 4 – статор; 5 – вал привода; 6 – выходной патрубок

Рисунок 16 – Роторный аппарат с боковыми поверхностями ротора и статора образованными рядами отстоящих друг от друга стержней.

На рисунке 17 представлен роторно-пульсационный аппарат, в котором размещен жестко связанный с ротором дополнительный входной патрубок, имеющий насадку. В верхних и нижних крышках ротора и статора аппарата выполняются отверстия, а в насадке - отверстия, соосные всем отверстиям ротора и статора. Компоненты обрабатываемой среды поступают в аппарат через патрубок входа 1, затем в дополнительный патрубок 4 и далее в полость соединенной с ним насадки 5, откуда через ее отверстия 6 струя жидкости кратчайшим путем из-за соосности отверстий насадки и отверстий

ротора попадает в отверстия 11-13 постоянно вращающегося от привода 10 ротора 9» [11].



1 – входной патрубок; 2 – статор; 3, 7, 8 – отверстия статора; 4 – дополнительный входной патрубок; 5 – насадка; 6 – отверстия насадки; 9 – ротор; 10 – привод; 11-13 – отверстия ротора

Рисунок 17 – Роторный аппарат с дополнительным входным патрубком

«При работе данного аппарата устраняются нерадиальные перемещения жидкости и уменьшаются потери на трение. Периодическое совмещение отверстий ротора 9 и отверстий 8 неподвижного статора 2 вызывает генерацию турбулентных пульсаций во всех трех измерениях, обеспечивая тем самым повышение эффективности работы аппарата.

Таким образом, в результате проведенного обзора существующих способов мелкодисперсного измельчения материалов рассмотрены конструкции и принципы действия используемых для этого устройств. Наиболее соответствующими из которых являются гидродинамические роторные аппараты с периодическим прерыванием потока обрабатываемой среды».

«Существующие гидромеханические устройства технологически позволяют, загружая куски крупностью 0,8–1,5 мм, выдавать мелкодисперсный материал крупностью менее 0,1 мм. Такие аппараты заменяют собой традиционные стержневые и шаровые мельницы для тонкого и сверхтонкого измельчения материалов. Тем самым обеспечивается снижение затрат на энергопотребление, из процесса исключается основной

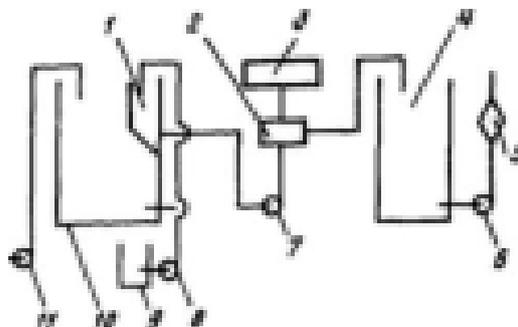
источник значительных потерь полезного ископаемого и не происходит заражение руды железом из-за неэффективного намола. К примеру, за счет износа мелющих тел в мельницах удельный расход стали составляет 1-3 кг/т измельчаемой руды. Одновременно с перечисленными процессами повышается степень раскрытия минералов-носителей полезного ископаемого и самих его частиц».

«Гидромеханические устройства различных типов (механические диспергаторы, коллоидные мельницы, гомогенизаторы, импульсные гидроударно-кавитационные устройства, акустические диспергаторы) отличаются по своим основным параметрам, в том числе, и по одному из самых важных - по удельному расходу энергии на производство мелкодисперсной смеси. Роторные аппараты с периодическим прерыванием потока обрабатываемой среды конструктивно представляют собой импульсные гидроударно-кавитационные устройства. Данные устройства являются наиболее эффективными гидромеханическими устройствами, применяющимися для мелкодисперсного измельчения материалов. Удельный расход электроэнергии на процесс измельчения в данном устройстве наименьший, а дисперсный состав производимых смесей наиболее приемлемый для вскрытия полезного компонента труднообогатимой руды [16]. В таблице 1 приведены сведения по эффективности гидромеханических устройств для реализации процесса мелкодисперсного измельчения материала» [19].

Таблица 1 – Эффективность гидромеханических устройств

Тип	Удельный расход энергии, кВтч/м ³	Средний диаметр частиц, мм
механическая мешалка	1,5	2 - 8
коллоидная мельница	7,0	4 - 7
гомогенизатор	5,6	1 - 3
импульсное гидроударно кавитационное устройство	1,0	0,2 – 1,2

Рассмотрим принцип действия нескольких типов гидромеханических аппаратов для мелкодисперсного измельчения материалов. Ультразвуковая установка с магнитострикционной колонкой показана на рисунке 18.

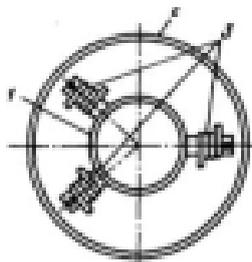


1 – бак для руды; 2 – магнитострикционная колонка; 3 – генератор колебаний; 4 – бак для смеси; 5 – фильтр; 6-8, 11 – насосы; 9 – бак для хранения руды; 10 – бак для воды

Рисунок 18 – Схема установки с магнитострикционной колонкой

«Процесс мелкодисперсного измельчения материала на установке протекает следующим образом. Бак 10 заполняется водой под давлением водопроводной магистрали, а в случае низкого давления - при помощи насоса 11. В верхней части бака 10 помещен бак 1 для руды, которая подается насосом 8. Смесь воды и руды перекачивается для приготовления рабочей жидкости насосом 7 через магнитострикционную колонку 2 в бак 4. Внутри магнитострикционной колонки смесь под воздействием ультразвуковых колебаний переходит в высокодисперсную. Напряжение возбуждения на магнитострикционные преобразователи ультразвуковой колонки подается с ультразвукового генератора 3. Из бака 4 готовая смесь при помощи насоса 6 перекачивается для дальнейшего потребления. Бак 9 предназначен для хранения готовой смеси. Перед приготовлением смеси баки 10 и 1 заполняются соответственно водой и рудой, после чего включается ультразвуковая колонка 2 и насос 7. Магнитострикционная колонка, изображенная на рисунке 19, представляет собой трубчатый

магнитострикционный излучатель 1, помещенный в цилиндрический кожух 2» [16].



1 – излучатель; 2 – цилиндрический кожух; 3 – магнитострикционные преобразователи

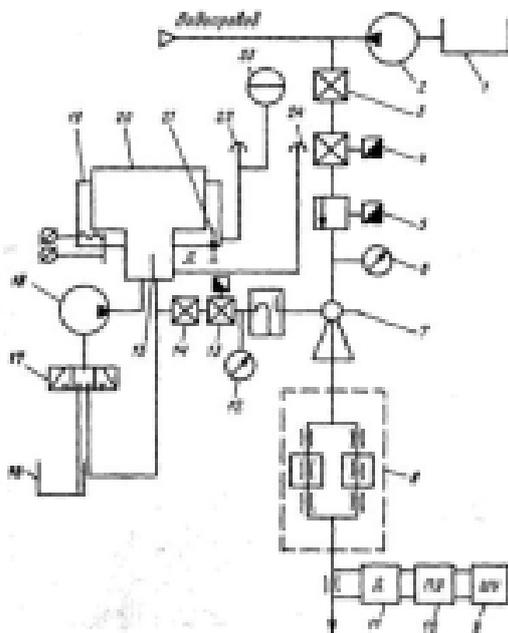
Рисунок 19 – Схема магнитострикционной колонки.

«Смесь воды и руды, поступая в цилиндрический кожух, охлаждает магнитострикционные преобразователи 3. Затем, проходя внутри трубчатого излучателя, смесь подвергается воздействию интенсивного ультразвукового поля, в результате чего превращается в высокодисперсную. Наилучшие результаты на первых этапах использования ультразвуковых установок с гидродинамическими вихревыми излучателями показала широко применяемая в различных производствах установка с ультразвуковым гидродинамическим излучателем. Основным элементом установки – ультразвуковой гидродинамический вихревой излучатель, состоящий из цилиндрического корпуса, в котором верхняя часть – водонапорная камера, а нижняя – камера озвучивания (диспергирования). Принцип работы излучателя заключается в следующем. Вода через штуцер поступает в водонапорную камеру и затем по спиральной резьбе попадает в камеру озвучивания, образуя вихревой гидродинамический поток в осевом направлении. Вода проходит между конусом улитки и наконечником эжектора. Скорость движения при этом возрастает, а давление падает. В результате возникают мощные вихревые потоки, генерирующие

ультразвуковые колебания, происходит диспергирование смеси и перемешивание ее с водой [18].

Частота колебаний зависит от количества вихрей, проходящих за единицу времени через какую-либо точку поверхности препятствия, от скорости их движения в среде и от расстояния между центрами соседних вихрей» [21].

К гидромеханической диспергирующей технике с гидродинамическим излучателем относится ультразвуковой гидродинамический диспергатор, изображенный на рисунке 20.

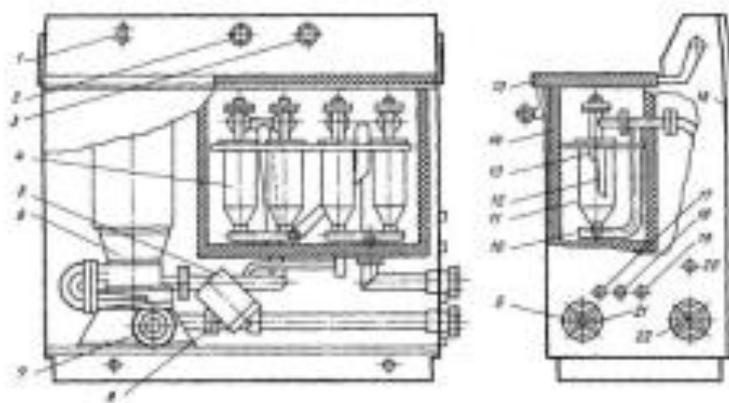


1 – бак для водоподготовки; 2 – лопастной насос; 3 – пробковый кран; 4, 5 – регулирующие клапаны; 6 – манометр; 7 – струйный насос; 8 – гидродинамический генератор; 9 – шкаф управления; 10 – пульт; 11 – датчик концентрации; 12 – манометр; 13 – вентиль; 14 – клапан, 15 – датчик; 16 – емкость; 17 – клапан; 18 – насос; 19 – бак для воды; 20 – бак; 21 – датчик; 22 – уровнемер; 23 – реле контроля уровня; 24 – датчик уровня

Рисунок 20 – Схема установки ультразвукового гидродинамического диспергатора:

«Установка работает следующим образом. Насосом 18 смесь из специальной емкости 16, через регулирующий клапан 17, подается в бак 20,

размещенный в баке для воды 19. При помощи электромагнитного вентиля 13 смесь подается на сдвоенный ультразвуковой гидродинамический генератор 8. На этот же генератор с помощью электромагнитного вентиля 4 дополнительно подается вода из водопровода или бака водоподготовки 1. В последнем случае используется лопастной насос 2. Уровень воды в баке 19 контролируется уровнемерами 22 и 24 и реле контроля уровня 23. Ручное запираание баков производится пробковым краном 3 и клапаном 14. В установке предусмотрен специальный бак 7 – для водоподготовки и манометры 6 и 12 для измерения и контроля давления. Известен также ультразвуковой гидродинамический смеситель-диспергатор изображенный на рисунке 21



1 – пусковая кнопка; 2 – манометр; 3 – вакуумметр; 4 – блок излучателей; 5 – фильтр; 6 – насос; 7 – струйник; 8 – дренаж; 9 – каркас; 10 – трубопроводы; 11 – акустический стакан; 12 – пластина; 13 – сопло; 14 - звукоизоляция; 15 – крышка; 16 – дверцы; 17 – вход; 18 – выход охлаждающей воды; 19 – слив утечек; 20, 22 – патрубki входа компонентов обрабатываемой рабочей смеси; 21 – патрубок выхода готовой смеси

Рисунок 21 – Ультразвуковой гидродинамический смеситель-диспергатор

Наиболее эффективным для интенсификации сложного комплекса явлений в процессе мелкодисперсного измельчения упорных руд являются технологические аппараты, акустические колебания в которых создаются нестационарными разгоннотормозными течениями. К таким аппаратам

относятся импульсные гидроударнокавитационные устройства, в которых упругие колебания создаются самой обрабатываемой средой за счет ее нестационарного режима течения» [27]. Проведем сравнение эффективности работы гидродинамических устройств на примере мелкодисперсного измельчения труднообогатимых руд согласно таблицы 2.

Таблица 2 – Характеристики устройств для мелкодисперсного измельчения труднообогатимого материала

Устройство	Производительность, м ³ /ч	Потребляемая мощность, кВт	Масса, кг	Объем, м ³	Средний диаметр частиц, мм
ультразвуковая установка с магнитострикционной колонкой	2	20	900	2,5	0,5
ультразвуковая установка с гидродинамическим вихревым излучателем	15	5,5	1400	5	0,4
ультразвуковой гидродинамический диспергатор	30	18,5	1000	2	0,4
ультразвуковой гидродинамический смеситель	7	6	600	1,5	0,3
устройство импульсного гидроударно-кавитационного воздействия	10	4	120	0,25	0,2

Как показывают результаты анализа, из всех гидродинамических устройств, подходящих для мелкодисперсного измельчения твердых сыпучих материалов, наилучшими показателями обладает устройство импульсного гидроударно-кавитационного воздействия. Что означает, что данный способ возможно использовать для измельчения сульфата аммония в производстве сульфат-нитрата аммония для повышения качества продукта и снижения энергозатрат процесса [26].

2. Технологическая часть

2.1 Описание технологической схемы производства

При производстве сульфат-нитрат аммония используется технология гранулирования с применением барабанного гранулятора типа Spherodizer – барабанный гранулятор-осушитель (БГС), в которой функции гранулирования и осушки объединены и выполняются в одном вращающемся барабане.

Суспензия сульфат-нитрата аммония состоит из раствора нитрата аммония, измельченных кристаллов сульфата аммония, и наполнителя (доломитовой муки).

Для получения суспензии надлежит выполнить следующие этапы:

- измельчение кристаллов сульфата аммония;
- отделение гранулирования и осушка гранул;
- грохочение, охлаждение и нанесение покрытия.

На первом этапе кристаллы делятся на фракции: первая фракция с размерами менее 800 микрометров и вторая – с размерами более 800 микрометров. Первая фракция подается в бункер (поз.01-Н-001) откуда пневмокамерным насосом поз.01-Р-010 перемещается в бункер поз.01-Н-1, оснащенный фильтром циклонного типа поз.01-Ф-010 и шлюзовым питателем поз. 01-Z-007, который в свою очередь выгружает СА на ленточный транспортер поз. 01-L-001 оснащенный конвейерными весами поз.01-Х-1 в контролирующей заданный расход СА в первый резервуар перемешивания (поз.01-Т-003). Вторая фракция из бункера (поз.03-Н-001) подается в дробилку (поз.03-Z-002) ленточным питателем (поз.03-L-001), а затем, после сепарации в мешочном фильтре (поз.03-Ф-001), посредством шнекового питателя (поз.03-L-006) поступает во второй резервуар перемешивания (поз.01-Т-004). Это разделение на два потока кристаллов позволяет снизить

потребление электроэнергии (используется только одна дробилка вместо двух).

Операция выполняется в двух резервуарах перемешивания поз.01-Т-003 и 01-Т-004, каждый из которых оснащен эффективным смесителем (поз.01-А-001 и поз.01-А-002, соответственно) и паровым змеевиком для регулирования температуры суспензии перед гранулированием (суспензия самотеком поступает из первого резервуара во второй). На выходе из второго резервуара перемешивания сульфат-нитрат аммония направляется в распылители – «пистолеты» барабанного гранулятора-осушителя (БГС) посредством насоса поз.01-Р-003А;

Основным аппаратом в отделении гранулирования и осушки гранул является гранулятор-осушитель. Барабанный гранулятор-осушитель (БГС) поз.02-Д-001 представляет собой вращающийся барабан, разделенный на две части круговой сливной перегородкой, причем, каждая часть оснащена специально спрофилированными подъемными приспособлениями, которые крепятся болтами к корпусу (при необходимости, их можно регулировать; они заменяются в случае поломки или износа).

Принцип гранулирования заключается в наслаивании или гранулировании в режиме «луковой шелухи», в результате которого образуется гранула с послойно нарастающими слоями (гранула выглядит напоминающей множество слоев «луковой шелухи» или образовавшуюся в облаке градину).

Чтобы получить такой результат, недостаточно просто распылить суспензию сульфат-нитрата аммония (образуются слишком большие капли); необходимо получить суспензию в мелкодисперсном состоянии, которая наносится на поверхность твердой рециркулирующей частицы, попавшей в барабан из конвейера рециркуляции поз.02-Л-005; с этой целью несколько распылителей – «пистолетов», установлены на входе барабана, причем, каждый из них оснащен инжектором пара для очистки и промывки при останове установки. Эти устройства изготовлены из нержавеющей стали и

включают специальные внутренние детали из керамики, что позволяет избежать как коррозии, так и абразивного износа.

Сжатый воздух поступает от воздушных компрессоров поз.02-К-2А/В/С сухого типа, через ресивер поз.02-Т-1. Воздух дополнительно подогревается паром низкого давления в подогревателе воздуха (поз.02-Е-3).

Для удаления тепла и влаги, выделяющегося в результате процесса кристаллизации, на вход гранулятора-осушителя (БГС) поз.02-D-001 подается воздух; этот воздушный поток представляет собой смесь предварительно подогретого атмосферного воздуха и повторно используемого воздуха из барабана холодильника поз.02-D-002; он распределяется на входе в секцию гранулирования с помощью соответствующих дефлекторов, чтобы избежать попадания распыленной до мелкодисперсного состояния суспензии на кожу барабана или подъемные приспособления.

Гранулы выпадают из гранулятора-осушителя поз.02-D-001 и подаются при помощи конвейера гранулятора-осушителя поз.02-L-001, элеватора поз.02-L-002 и конвейера поз.02-L-003 на грохоты поз.02-S-001А/В.

Выходящий из БГС поз.02-D-001 воздух всасывается воздуходувкой поз.02-В-005 после прохождения через батарею циклонов поз.02-F-002А/В/С; собранная пыль, направляется на переработку во второй резервуар перемешивания поз.01-Т-004. Затем воздух из циклонов направляется в мокрый скруббер поз.02-V-002 для окончательной очистки.

На стадии грохочения, охлаждения и конденсации происходит просеивание гранул на сетчатом фильтре в грохотах поз.02-S-001А/В, поз.02-S-002, их охлаждение в барабанном холодильнике поз.02-D-002, опудривание тальком и нанесение антислеживающей добавки в барабане нанесения покрытия поз. 02-D-003.

Гранулированный сульфат-нитрат с ленточного конвейера (поз.02-L-003), сначала подается на грохоты поз. 02-S-001А/В, где отсеивается мелкая и крупная фракция. Крупная фракция – более 4,25 мм направляется на

измельчение в дробилку поз.02-Z-001, мелкая фракция – менее 2,9 мм возвращается в процесс на рециркуляцию в барабанный гранулятор-осушитель поз.02-D-001.

Для регулирования подачи поступающего на переработку в барабан общего количества продукта установлен второй грохот (поз.02-S-002) для товарного продукта, позволяющий отправить на переработку часть крупной фракции, полученной на конечном этапе.

Существует возможность выводить избыток мелкой фракций на узел затаривания «биг-бегов» поз.02-X-1 (к.940А), откуда заполненные «биг-беги» автопогрузчиком вывозят на временное хранение в корп. 921 для дальнейшего использования в контуре рециркуляции, по узлу приема и подачи СНА на первоначальное заполнение.

Сформировавшиеся гранулы сульфат-нитрат аммония, фракцией более 2,9 мм и менее 4,25 мм, ленточным конвейером поз.02-L-004 направляются в барабанный холодильник поз.02-D-002, куда подается кондиционированный воздух для окончательной осушки и охлаждения гранул, куда подается охлажденный осушенный воздух от установки кондиционирования воздуха поз.02-E-002.

В зимний период для поддержания температуры воздуха, часть выходящего из барабана поз.02-D-002 потока направляется снова на вход в барабан-охладитель.

Охлажденные гранулы из барабана охладителя поз.02-D-002 подаются элеватором поз.02-L-006 в барабан нанесения покрытия поз.02-D-003 для последующей обработки антислеживающим реагентом Флотигам V4900.

Антислеживающий реагент Флотигам V4900 находится в резервуаре покрывающего реагента поз.02-T-001 оснащенного змеевиком для осуществления обогрева и поддержания его в жидком состоянии. Теплоноситель змеевика паровой конденсат. Антислеживающий реагент насосами поз.02-P-001А/В подается в барабан для нанесения покрытия

поз.02-D-003, где распыляется через форсунки на гранулы, уже опудренные на входе тальком.

Тальк подается в барабан шнековым дозирующим транспортером поз.02-L-011 из бункера хранения талька поз.02-H-002.

Полученный гранулированный сульфат-нитрат аммония транспортируется с помощью ленточного конвейера поз.02-L-007 по системе ленточных конвейеров (к.940В) и башен пересыпки Б-1,2 либо на узел фасовки в биг-беги (корп.915Б), либо на складирование насыпью (на восточную часть чаши-склада корп.915)

В барабанный холодильник поз.02-D-002 охлажденный осушенный воздух поступает от установки кондиционирования воздуха. Установка кондиционирования воздуха выполнена в виде компактного блока, включающего воздушный фильтр холодильника поз.02-F-003 (для предотвращения попадания пыли из атмосферы), воздушный холодильник поз.02-E-002А, каплеуловитель (поз.02-F-004) (для удаления атмосферной влаги, конденсирующейся при охлаждении) и воздушный подогреватель поз.02-E-002В (для подогрева воздуха до температуры несколько выше точки росы, чтобы избежать попадания воды в продукт).

Образующийся газообразный аммиак из воздушного холодильника поз.02-E-002А выдается в сборник газообразного аммиака поз.Р-100, и под давлением выдается в сосуд технологического аммиака поз.01-V-001, предусмотрена выдача аммиака в заводскую сеть через клапан РС-254.

Часть запыленного воздуха отсасывается из барабанного холодильника поз.02-D-002 вытяжным вентилятором поз.02-B-003 в барабанный гранулятор-осушитель БГС поз.02-D-001, а другая часть поступает на мокрую очистку в скруббер поз.02-V-002.

В процессе производства СНА потоки технологического воздуха загрязняются газообразным аммиаком, пылью сульфат-нитрата аммония и сульфатом аммония. При работе конвейерного оборудования и

оборудования, в которых обращаются сыпучие сухие продукты, также образуются потоки загрязненного аспирационного воздуха.

Очистка загрязненного пылью воздуха перед сбросом в атмосферу на данной установке осуществляется в две стадии: на первой запыленный воздух последовательно очищается в циклонах гранулятора-осушителя поз.02-F-002А/В/С и в циклонах скруббера поз.02-F-005А/В/С, а на второй подвергается мокрой очистке в скруббере поз.02-V-002.

В циклоны гранулятора-осушителя поз.02-F-002А/В/С поступает поток запыленного воздуха из барабанного гранулятора-осушителя поз.02-D-001.

В циклоны скруббера поз.02-F-005А/В/С поступают потоки запыленного воздуха от точек аспирации следующего оборудования:

- загрузочного элеватора грохота поз.02-L-002;
- ленточного конвейера грохота поз.02-L-003;
- первого грохота СНА поз.02-S-001А и поз.02-S-001В;
- второго грохота СНА поз.02-S-002;
- дробилки крупной фракции СНА поз.02-Z-001;
- ленточных конвейеров поз.02-L-004, поз.02-L-005;
- периодический сброс продувочного воздуха от пневмокамерного насоса поз.01-P-10.

Загрязненный воздух от других источников, и газовая фаза с системы воздушных стadiи синтеза непосредственно подаются по общему коллектору через трубу Вентури в скруббер мокрой очистки (поз.02-V-002).

Атмосферный воздух после очистки в фильтре 02-F-001 направляется в подогреватель поз. 02-E-001 и воздуходувкой поз.02-B-001 подается в барабанный гранулятор - осушитель поз.02-D-001; температура воздуха подаваемого в барабан регулируется расходом пара на подогреватель через клапан поз.ТВ-032.

Барабан гранулятор-осушитель функционирует при небольшом разрежении, создаваемом вытяжным вентилятором поз.02-B-005, находящимся после батареи циклонов поз.02-F-002А/В/С. Пыль, собранная

циклонами поз.02-F-002А/В/С, направляется на переработку во второй резервуар перемешивания поз.01-Т-004 конвейером поз. 02-L-012. Затем запылённый воздух из циклонов направляется в трубу Вентури и далее в скруббер поз.02-V-002 для окончательной мокрой очистки.

Для исключения образования пыли на транспортирующем оборудовании (элеваторе поз.02-L-002, сетчатым грохотах поз.02-S-001А/В, дробилках нестандартных крупных частиц поз.02-Z-002, конвейере поз.02-L-004 и других механизмах) от сухих продуктов, установлено оборудование для удаления запыленного воздуха. Запыленный воздух собирается в специальный коллектор и направляется в циклоны поз.02-F-005А/В/С перед прохождением окончательной мокрой очистки в скруббере поз.02-V-002.

Окончательная очистка загрязненного воздуха происходит в скруббере поз.02-V-002. В скруббер мокрой очистки также поступают пары из резервуара нейтрализатора поз.01-Т-002, резервуаров перемешивания поз.01-Т-003 и поз.01-Т-004, инертные вещества из эжектора поз.01-Z-004, испарителя поз.01-E-003В, конечного конденсатора поз.01-E-011 и холодильника паров поз.01-E-005, дренажного сборника поз.01-Т-2.

Скруббер поз.02-V-002 состоит из обратной трубы Вентури, за которой установлен циклонный сепаратор для улавливания всей пыли – и нейтрализации аммиака (NH_3). Воздух вступает в контакт с распыленным циркулирующим раствором нитрата аммония, подаваемым насосами скруббера поз.02-P-002А/В. Поскольку раствор нитрата аммония имеет слабую кислую реакцию, имеющийся свободный аммиак взаимодействует с азотной кислотой, присутствующей в растворе, в результате чего образуется нитрат аммония, который остается в распыленной жидкости. Для улавливания последних остатков аммиака и частиц пыли используется промывной раствор.

Промывной раствор, отделенный от потока воздуха из нижней сепарационной части скруббера самотеком стекает в резервуар скруббера поз. 02-Т-003. В резервуар также поступают конденсат от вакуумной

установки поз. 01-Z-005 и 30 %-ный раствор АС от насосов поз. 01-P-010А/В, также предусмотрена подача стоков насосом поз. 01-P-013А с наружной установки резервуара стоков поз.01-Т-007.

Насосы скруббера поз.02-P-002А/В перекачивают переработанный промывной раствор в два резервуара перемешивания поз.01-Т-003 и поз.01-Т-004, по линии ВПР через регулятор расхода FIRCA-021.

Уровень в скруббере поддерживается узлом регулирования LRCА-021 подачей технологического или парового конденсата в зависимости от технологической необходимости.

паровым конденсатом, для выполнения этой операции на выходе из барабана под 02-L-001 установлен съемный сток-коллектор поз.02-Z-003.

Кристаллический сульфат аммония (СА) из корп.915 с расходом 21,5 – 36 т/ч поступает по системе ленточных конвейеров, размещенных в конвейерных галереях (корп. 940В) в производственный корпус 940А, либо возвращается на склад корп.915 по действующей схеме.

Поступающий на производство СНА кристаллический сульфат аммония разделяется посредством классификации на две фракции: мелкую фракцию СА с размером частиц до 0,8 мм и крупную фракцию СА с размером частиц от 0,8 до 2 мм. Крупная фракция СА подвергается измельчению для поддержания высокой скорости растворения частиц СА в концентрированном растворе АС и требуемой степени однородности получаемой суспензии СНА. Отделение мелкой фракции от основного потока позволяет сократить затраты электроэнергии на измельчение СА.

В производственный корпус 940А кристаллический сульфат аммония поступает по конвейеру поз. 05-L-04 и подается через питатель поз. 03-Z-004 в грохот сульфата аммония поз. 03-S-001 для классификации кристаллов. В процессе классификации частицы СА мельче 0,8 мм направляются в бункер мелкой фракции СА поз. 01-Н-001, а более крупные частицы подаются в бункер кристаллов СА поз. 03-Н-001.

Уровень мелкой фракции СА в бункере поз. 01-Н-001 контролируется прибором LIRAh, hh, l-023 и дополнительно датчиками уровня LAhh-011, LAI-113 и LAI-143. Предельные (35 % и 85 %) и предаварийные (10 % и 87,5 %) значения уровня сигнализируются. При достижении уровня в поз. 01-Н-001 значения 87,5 % и срабатывании датчика уровня LAhh-011 активируется блокировка I-042 с остановом грохота сульфата аммония поз. 03-S-001 (задержка 4 минуты).

При достижении уровня в поз. 01-Н-001 значения 35 % и срабатывании датчика уровня LAI-113 активируется блокировка I-144 с открытием шиберного затвора разгрузочной тележки поз. 05-L-01.3 на конвейере поз. 05-L-01 и пуском конвейера поз. 05-L-04 (корп. 915), пуском питателя грохота поз. 03-Z-004 и грохота сульфата аммония поз. 03-S-001.

При останове грохота СА поз. 03-S-001 по блокировке I-043 осуществляется автоматический останов питателя грохота СА поз. 03-Z-004. При останове питателя поз. 03-Z-004 по блокировке I-044 автоматически останавливается ленточный конвейер поз. 05-L-04 (корп. 940В) и закрывается шибер разгрузочной тележки поз. 05-L-01.3 на конвейере поз. 05-L-01 (корп. 915). В результате подача кристаллического СА в производственный корп. 940А прекращается. Поток сульфата аммония при этом направляется на склад корп. 915.

Крупная фракция СА из бункера поз. 03-Н-001 поступает на ленточный питатель СА поз. 03-L-001 и через поворотный клапан поз. 03-Z-002а (шлюзовой затвор) дозируется в дробилку СА поз. 03-Z-002. Подача сульфата аммония в дробилку контролируется по конвейерным весам поз. WQIR-0305, установленным на питателе поз. 03-L-001, а регулирование расхода СА в дробилку осуществляется изменением частоты вращения привода питателя поз. 03-L-001 частотным регулятором.

В дробилке поз. 03-Z-002 кристаллы крупной фракции СА подвергаются измельчению до размера частиц не более 200 мкм. Дробилка поз. 03-Z-002 входит в состав комплектной установки измельчения

кристаллов СА поз. 03-Z-005. Кроме дробилки в установку измельчения поз. 03-Z-005 входят: ленточный питатель СА поз. 03-L-001, поворотный клапан поз. 03-Z-002а, мешочный фильтр кристаллов СА поз. 03-F-001, экстрактор СА поз. 03-L-002, поворотный клапан поз. 03-Z-003, вытяжной вентилятор мешочного фильтра СА поз. 03-B-001 и система смазки мельницы.

Дробилка поз. 03-Z-002 представляет собой валковую мельницу, внутри которой измельчение материала происходит под действием сжимающих и срезающих усилий между размольными валиками и размольным кольцом. Измельчаемый материал, поступающий в дробилку, подается специальными лопастями от днища в область между размольными валиками и размольным кольцом. Из дробилки измельченный материал выносится потоком воздуха в радиальный классификатор, расположенный в верхней части дробилки. В классификаторе под действием центробежной силы разделяются мелкие и крупные частицы СА, мелкие частицы увлекаются потоком воздуха из дробилки в мешочный фильтр поз. 03-F-001, а крупные возвращаются в нижнюю часть дробилки для дополнительного измельчения. Электродвигатели привода ротора дробилки, на котором установлены размольные валки и привод классификатора, имеют частотные регуляторы (позиция 3410, 3420), с помощью которых соответственно осуществляется управление производительностью дробилки и степенью помола кристаллов СА. Номинальная производительность дробилки составляет 18 – 20 т/ч.

При работе дробилки в ее корпусе поддерживается разрежение в 4,5 – 6 кПа за счет работы вытяжного вентилятора мешочного фильтра СА поз. 03-B-001. Разрежение в дробилке контролируется прибором PIR-3404. Основной поток воздуха поступает в дробилку через патрубок в нижнем корпусе дробилки по циркуляционному воздуховоду. Дополнительный объем воздуха за счет разрежения засасывается из помещения по специальным гибким воздуховодам для продувки и охлаждения классификатора и продувки маятников.

В процессе измельчения СА происходит выделение тепловой энергии, за счет чего циркулирующий через дробилку воздух нагревается до 15 – 65°C (TIRAh-5502). Также в процессе измельчения происходит испарение влаги из измельчаемого сульфата аммония, в результате чего возрастает влажность воздуха (MIRAh-7201), циркулирующего через дробилку. Для регулирования температуры и влажности циркулирующего в системе воздуха предназначены регулируемые поворотные электродвигатели HVS-3431 и HVS-3441. Двигателем HVS-3431 регулируется количество воздуха, выводимого из системы за пределы производственного корпуса, а двигателем HVS-3441 - количество свежего наружного воздуха, поступающего в систему (до 18000 м³/ч). Таким образом, в дробилку поступает смесь циркуляционного воздуха, после фильтра поз. 03-F-001, и свежего наружного воздуха. Температура и расход свежего воздуха контролируются по приборам TIRAh-7191 и FIRAh-7192, температура воздуха после смешения по прибору TIRAh-3405.

Измельченные частицы сульфата аммония отделяются от потока циркуляционного воздуха в мешочном фильтре поз. 03-F-001 посредством фильтрации через фильтрующие элементы, изготовленные из синтетического материала в виде мешков или рукавов. Очищенный воздух поступает из фильтра на всас вентилятора поз. 03-B-001, а частицы СА падают в нижнюю бункерную часть фильтра, откуда встроенным шнековым транспортером поз. 03-L-002 дробленый сульфат аммония подается через поворотный клапан поз. 03-Z-003 в ковшовый элеватор поз. 03-L-003. Перепад давления на входе и на выходе из фильтра контролируется прибором поз. PDIRAh-7206. Предусмотрена сигнализация при достижении максимального значения перепада в 1,5 кПа. Фильтр оснащен пневматической системой очистки фильтрующих элементов периодической продувкой сжатым воздухом. Управление продувкой осуществляется автоматически по реле времени или вручную. Кроме продувки фильтрующих элементов осуществляется периодическая продувка подводящего воздухопровода (открытием поз. Y5500a),

от накопления пыли с низа бункерной части (открытием поз. Y5500b), для предотвращения уплотнения СА и потери текучести.

Расход циркуляционного воздуха, проходящего через дробилку и фильтр, контролируется прибором поз. FYIRCAh1-7205 и регулируется изменением частоты вращения привода вентилятора поз.03-B-001 с помощью частотного преобразователя. При нормальном технологическом режиме расход воздуха поддерживается равным 38400 м³/ч.

В состав дробилки поз.03-Z-002 входит система смазки, выполненная в виде отдельного комплектного узла, предназначенная для фильтрации масла и поддержания требуемого расхода циркуляции масла в системах смазки подшипников ротора дробилки и главного привода. Контролируются показатели температуры (TIRAh-3474), давления масла (PI-3455), расхода масла (FAI-3473 и FAI-3451) и уровня масла в баке (LAI-3456).

Автоматический останов дробилки поз. 03-Z-002 по блокировке I-145 предусмотрен при достижении уровня крупной фракции СА в бункере кристаллов СА поз. 03-H-001 значения 10 % и срабатывании датчика уровня LAI-114, а также по комплектным датчикам установки измельчения поз. 03-Z-005.

Измельченный СА от поворотного клапана поз. 03-Z-003 по пересыпке поступает в ковшовый элеватор поз. 03-L-003, поднимается им на отметку +21,0 м и подается в бункер измельченного СА поз. 01-H-003. Элеватор поз. 03-L-003 работает с контролем скорости движения SAI-015 и уровня заполнения продуктом нижней части элеватора LAh-008. Предельные параметры сигнализируются с одновременным срабатыванием автоматических защитных блокировок с остановом элеватора поз. 03-L-003:

- при падении скорости элеватора – по блокировке I-037;
- при превышении уровня заполнения – по блокировке I-038.

В свою очередь, останов элеватора поз. 03-L-003 активирует срабатывание цепочки автоматических защитных блокировок: I-033 с

остановом работы поворотного клапана поз.03-Z-003 и I-034 с остановом шнекового экстрактора поз. 03-L-002.

Уровень измельченного СА в бункере поз. 01-H-003 контролируется прибором LIRAh,hh,1-025 и дополнительно датчиками уровня LAhh-010 и LAII-144. Предельные (35 % и 5 %) и предаварийные (10 % и 87,5 %) значения уровня сигнализируются. При достижении в бункере поз. 01-H-003 уровня значения 87,5 % и срабатывании датчика уровня LAhh-010 активируется блокировка I-032 с остановом ковшового элеватора поз. 03-L-003.

Бункеры СА поз. 01-H-001, 03-H-001 и 01-H-003 снабжены рукавными бункерными фильтрами поз. 01-F-6, 01-F-7 и 01-F-8, соответственно, малой производительности для очистки запыленного воздуха, вытесняемого из бункеров. Фильтры оснащены пневматической системой очистки сжатым осушенным воздухом. Давление подаваемого на продувку воздуха регулируется клапаном поз. PCV-238, продувка производится вручную аппаратчиком.

Из бункера поз. 01-H-003 измельченный СА комплектным шлюзовым питателем непрерывно подается на дозатор измельченного СА поз. 01-L-003, которым сульфат аммония дозируется во второй резервуар перемешивания поз. 01-T-004 ковшовым элеватором поз. 01-L-1 по конвейеру поз.02-L-012. Предусмотрен автоматический останов шлюзового питателя при остановке дозатора поз. 01-L-003 (блокировка I-171).

Расход измельченного СА, подаваемого в резервуар перемешивания поз.01-T-004, контролируется прибором поз. FQIRCAI,II-009 по и регулируется в пределах от 10000 до 20000 кг/ч изменением частоты вращения электродвигателя привода дозатора с помощью частотного преобразователя поз. НИС-005. Значение расхода материала рассчитывается контроллером дозатора поз. 01-L-003 по измерениям конвейерных весов поз.01-X-3 и датчику скорости движения конвейерной ленты. Установка задания регулятора расхода поз. FQIRCAI,II-009 измельченного СА

осуществляется вручную из операторной. Предусмотрена сигнализация минимального (9900 кг/ч) и предаварийно-минимального расхода (8400 кг/ч) дробленного СА. Кроме этого уставка регулятора расхода поз. FQIRCA1,11-009 изменяется по управляющему воздействию регулятора уровня суспензии СНА в резервуаре поз. 01-Т-003 (LIRCAh1-010). Данный контур предназначен для поддержания постоянного весового соотношения между компонентами в получаемой суспензии СНА (концентрированным раствором АС и кристаллическим сульфатом аммония).

Дробленый СА из бункера поз. 01-Н-003 дозатором поз. 01-L-003 подается в элеватор поз. 01-L-1, скорость движения (SA1-01-L-1) и уровень заполнения нижней части (LAh-01-L-1) которого контролируются. Предельные параметры сигнализируются с одновременным срабатыванием автоматической защитной блокировки с остановом элеватора поз. 01-L-1. При останове элеватора поз. 01-L-1 дозатор измельченного СА поз. 01-L-003 останавливается по блокировке I-156.

Далее дробленый СА элеватором поз. 01-L-1 подается на ленточный конвейер поз. 02-L-012 для подачи в резервуар перемешивания поз. 01-Т-004 на приготовление суспензии СНА.

Мелкая фракция СА из бункера поз. 01-Н-001 транспортируется в отделение синтеза в первый резервуар перемешивания поз. 01-Т-003 с помощью системы пневмотранспорта СА поз. 01-L-004.

В систему пневмотранспорта СА поз. 01-L-004 входят пневмокамерный насос поз. 01-Р-10, циклон-разгрузитель поз. 01-F-010, бункер приемный поз. 01-Н-1, фильтры рукавные поз. 01-F-3А/В и поворотный клапан (шлюзовой питатель) поз. 01-Z-007. Пневмокамерный насос (ПКН) поз. 01-Р-10 размещен под бункером поз. 01-Н-001 в отделении гранулирования, остальное оборудование системы размещается в отделении синтеза. Конструкция насоса реализует пневмотранспорт с загрузкой сверху и выгрузкой материала снизу и позволяет осуществлять пневмотранспортирование материалов в плотном слое, что существенно

снижает потребление сжатого воздуха. Управление работой ПКН поз. 01-Р-10 осуществляется с комплектного местного щита управления или из операторной.

Сжатый осушенный воздух с расходом до 750 нм³/ч подается на питание ПКН поз. 01-Р-10 от ресивера сжатого осушенного воздуха поз. 02-Т-1. Периодический сброс сжатого запыленного воздуха с расходом до 3,5 нм³/мин при продувке насоса в конце каждого цикла осуществляется в воздуховод перед циклонами поз. 02-Ф-005А/В/С.

Технологическая схема приведена в приложении А.

2.2 Обоснование способа оптимизации процесса измельчения сульфата аммония

Сульфат аммония поступает на производство и при помощи грохота разделяется на две фракции. Условно «мелкую» и «крупную». Мелкая направляется на приготовление суспензии в концентрированном растворе сульфат-нитрата аммония в первый резервуар перемешивания. Крупная отправляется на дробление в валковой дробилке, из которой дробленый продукт выносится потоком воздуха в рукавный фильтр. Дробленый продукт из фильтра направляется, поступает во второй резервуар перемешивания, в который подается суспензия из первого резервуара. Полученная суспензия подается на стадию синтеза. Технологическая схема приведена на рисунке 22.

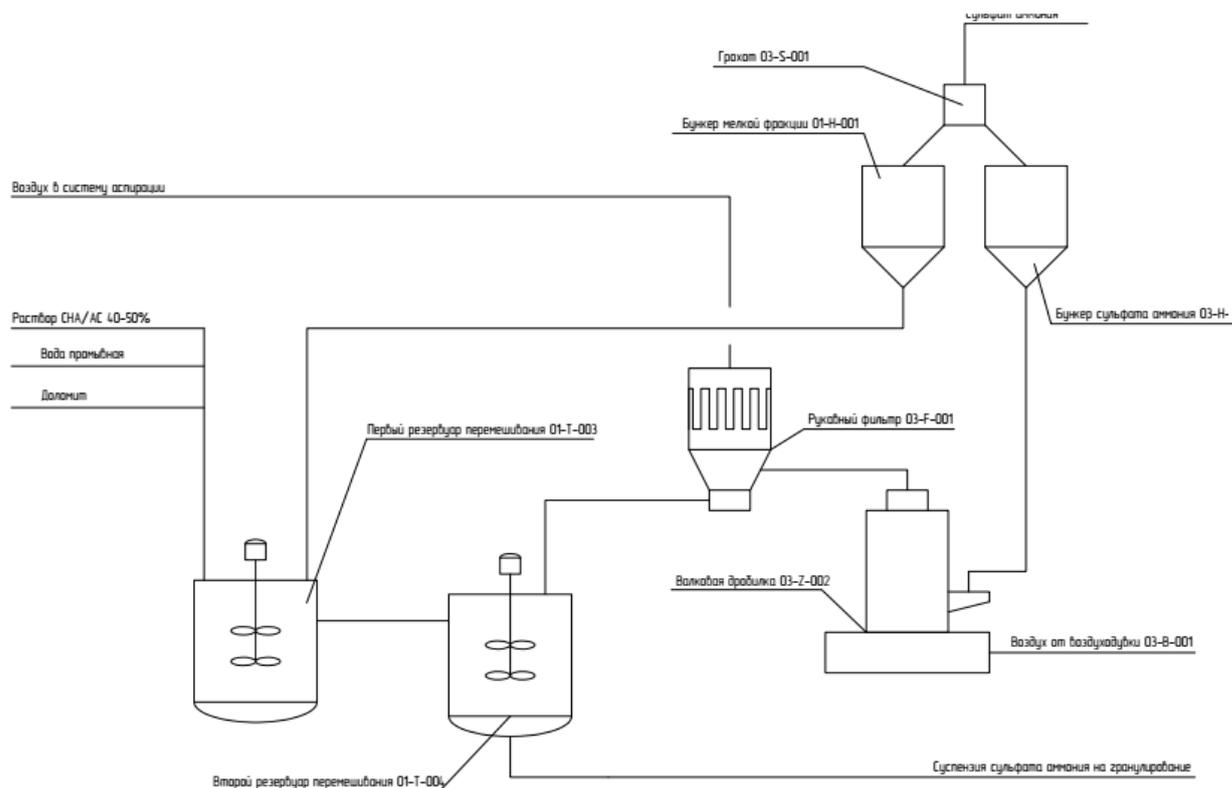


Рисунок 22 – Принципиальная схема узла приготовления суспензии сульфата аммония

На основании исследований предыдущего раздела можно предложить оптимизировать процесс измельчения сульфата аммония путем исключения из схемы валковой дробилки и замене ее диспергатором работающим по принципу гидроударно-кавитационному принципу. Таким образом, можно достичь увеличения доли частиц с диаметром до 0,3 мм до 99%. Что положительно скажется на качестве конечного продукта. Помимо этого, данное техническое решение позволит исключить из технологической схемы: бункер мелкой фракции сульфата аммония, грохота, рукавного фильтра. Также уменьшится количество ленточных конвейеров и снизится нагрузка на аспирационную систему. Технологическая схема оптимизированного процесса представлена на рисунке 23.

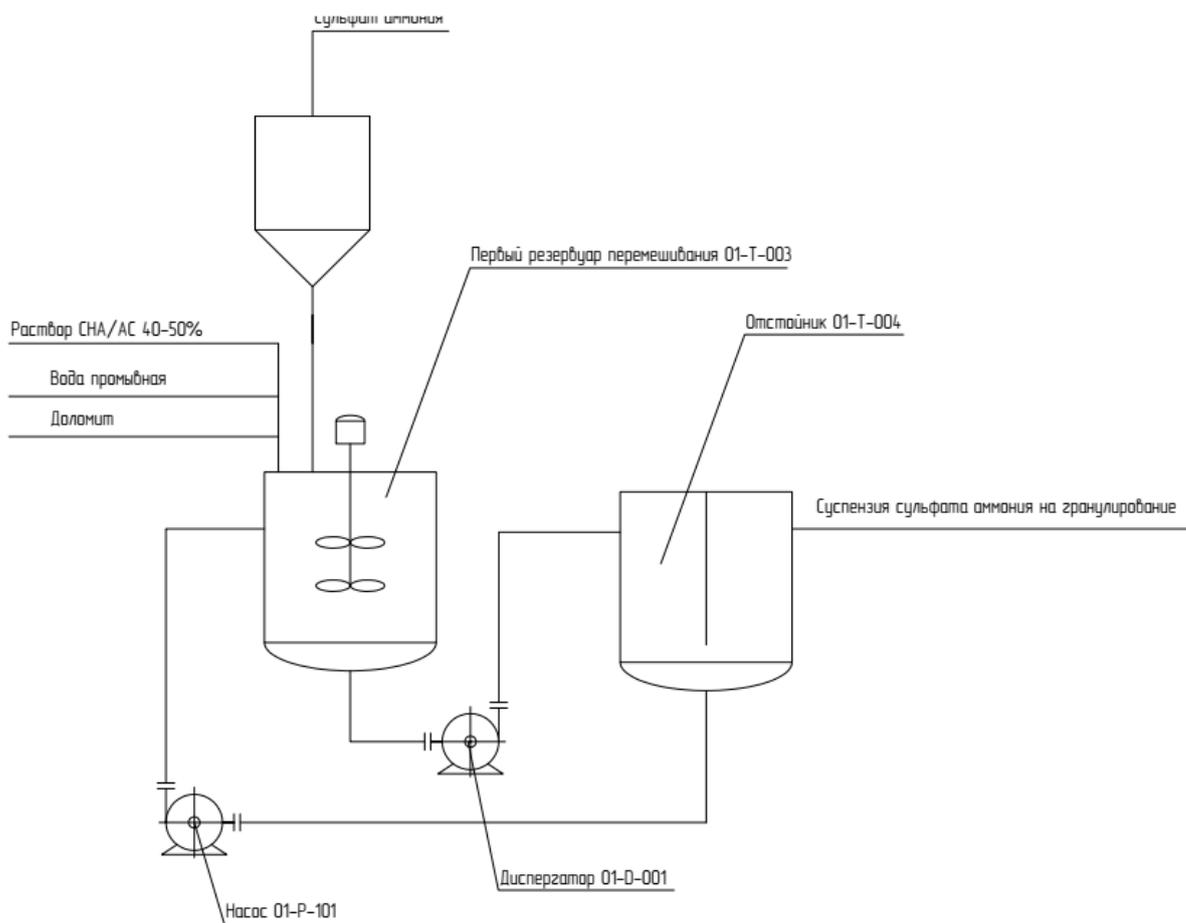


Рисунок 23 – Принципиальная технологическая схема оптимизированного узла приготовления суспензии сульфата аммония

В существующей схеме нет необходимости классифицировать сульфат аммония, соответственно нет необходимости в использовании грохота и двух бункеров. Смешение компонентов суспензии происходит в резервуаре перемешивания. Суспензия проходит через диспергатор и направляется в отстойник, где крупная фракция отделяется от общего потока суспензии и возвращается в первый резервуар перемешивания. Готовая суспензия направляется в отделение синтеза [24].

Выполнить задачу мелкодисперсного измельчения и гомогенизации суспензии кристаллов сульфата аммония позволит решить использование многоступенчатого гидроударно-кавитационного устройства. Диспергатор содержит корпус с входными и выходными патрубками, внутренний ротор с

лопастями центробежного насоса и цилиндрическим кольцом, по периметру которого выполнены отверстия. Общий вид машины представлен на рисунке 24.

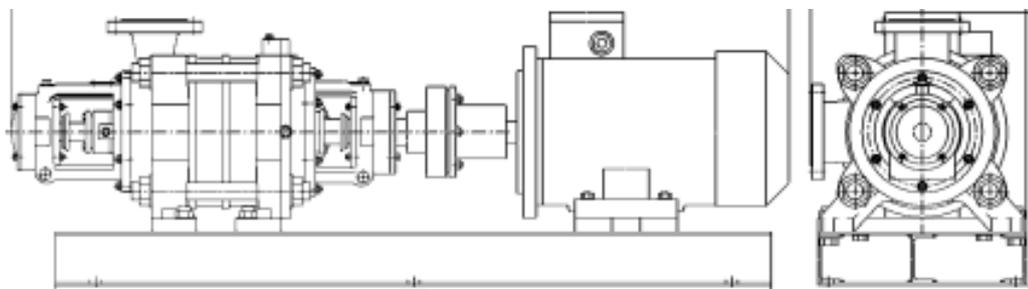
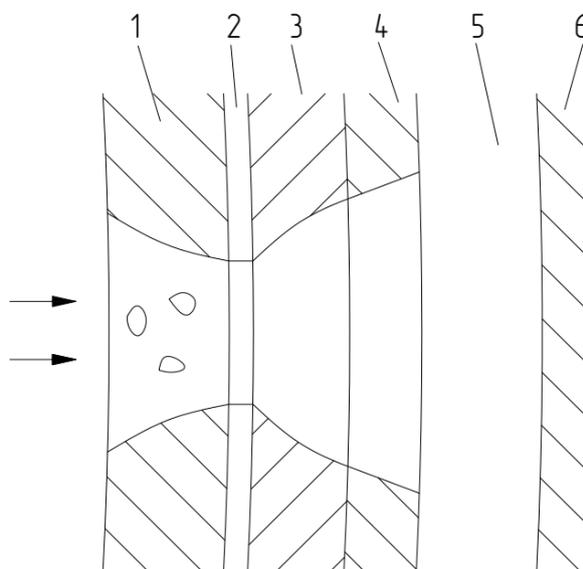


Рисунок 24 - Внешний вид диспергатора

Статор concentrically охватывает внутренний ротор и имеет отверстия по периметру цилиндрического кольца. Как показано на рисунке 25.



1- ротор, 2- зазор, 3- статор, 4 - укрепляющее кольцо, 5 –рабочая камера, 6- внешний корпус

Рисунок 25 – Схема работы диспергатора

Ротор, вращаясь, направляет обрабатываемую среду к внешней стороне рабочей камеры. В статоре и роторе выполнены отверстия. В процессе вращения ротора отверстия совпадают или перекрываются корпусом статора. В момент перекрытия происходит гидроудар. Когда отверстия совпадают – по ним движется перерабатываемая среда. Геометрия отверстий статора предопределяет расширение потока, что вызывает образование кавитационных пузырей, схлопывание которых разрушает частицы твердого материала, находящегося в обрабатываемой среде.

В зависимости от требуемой конечной величины диаметра частиц подбираются геометрические размеры элементов диспергатора, частоту вращения ротора и число ступеней измельчения [25].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что существующая технология подготовки сульфата аммония для синтеза сульфат-нитрата может быть оптимизирована путем внедрения процесса мокрого измельчения. Это позволит исключить из схемы дробилку, рукавный фильтр, бункер кристаллов сульфата аммония, грохот, воздухоувку. Также снизятся энергозатраты на проведение процесса измельчения

3 Расчетная часть

3.1 Материальный баланс резервуара смешения

В резервуар смешения поступают компоненты суспензии. При помощи перемешивающего устройства и диспергатора происходит процесс мокрого измельчения кристаллов сульфата аммония. Дисперсионной средой является насыщенный раствор сульфат нитрата аммония. Химического взаимодействия на данной стадии не происходит. Имеют место процессы механического характера. То есть изменяется не массовый расход компонентов, а их фракционный состав. В силу конструктивных особенностей устройства кавитационно-гидравлического диспергатора доля кристаллов требуемого диаметра на выходе составляет 99,9%.

Согласно действующего технологического регламента

Расход доломита $G_1 = 320$ кг/ч

Расход сульфата аммония $G_2 = 25000$ кг/ч

Расход раствора сульфат нитрата $G_3 = 22000$ кг/ч

Расход воды $G_4 = 2000$ кг/ч

Таблица 3 – Материальный баланс резервуара

Приход		Расход	
Наименование компонента	Расход, кг/ч	Наименование компонента	Расход, кг/ч
Раствор сульфат-нитрата аммония	22000	Раствор сульфат-нитрата аммония	24000
Вода	2000	Доломит	320
Доломит	320	Сульфат аммония, диаметром до 0,3 мм	24975
Сульфат аммония, диаметр от 4мм и менее	25000	Сульфат аммония, диаметром более 0,3 мм	25
Итого	49320	Итого	49320

Доля кристаллов сульфата аммония диаметром менее 0,3мм при использовании стандартной схемы составляет 85%. В предлагаемой – 99,9%. Что сказывается на качестве конечного продукта.

3.2 Тепловой баланс резервуара смешения

Исходные данные:

Температура поступающего доломита: 25 °С;

Температура поступающей сульфата аммония: 25 °С;

Температура поступающей воды: – 30 °С;

Температура поступающего раствора: 60 °С.

Уравнение теплового баланса:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = Q_6 + Q_7 \quad (1)$$

Удельные теплоемкости компонентов определяются из справочников [16, 29, 31].

Таблица 4 – Удельные теплоемкости компонентов

Компонент	C, Дж/кг*°C
Доломит	1500
Вода	4190
Раствор сульфат-нитрата аммония	3642
Сульфат аммония	1168

Расчет теплоты компонентов производится по формуле:

$$Q = G_i * c_i * T_i \quad (2)$$

где: G_i – масса компонента, кг, согласно таблицы материального баланса;

c_i – теплоемкость компонента, Дж/кг*°C, согласно таблицы 4;

T_i – температура компонента, °C по процессу.

Получаем:

- приход тепла в резервуар с доломитом:

$$Q_1 = 320 * 1500 * 298 = 143,04 \text{ МДж/ч}$$

- приход тепла в резервуар с сульфатом аммония:

$$Q_2 = 25000 * 1168 * 298 = 8701,6 \text{ МДж/кг}$$

- приход тепла в резервуар с водой:

$$Q_3 = 4190 * 2000 * 303 = 2539,14 \text{ МДж/кг}$$

- приход тепла в резервуар с раствора сульфат-нитрата аммония:

$$Q_4 = 22000 * 3642 * 333 = 26681,29 \text{ МДж/кг}$$

Количество тепла выходящего с суспензией из резервуара:

$$Q_6 = 49320 * 2340 * 333 = 38431,13 \text{ МДж/кг}$$

Количество теплотерь в окружающую среду:

$$Q_7 = Q_6 * \frac{5}{100} = 38431,13 * \frac{5}{100} = 1921,56 \text{ МДж/кг}$$

Количество теплоты, подводимой в рубашку реактора:

$$Q_5 = (Q_6 + Q_7) - Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (3)$$

Подставим значения в формулу:

$$\begin{aligned} Q_5 &= (38431,13 + 1921,56) - (143,04 + 8701,6 + 2539,14 + 26681,29) \\ &= 2287,62 \text{ МДж/кг} \end{aligned}$$

Полученные данные занесем в сводную таблицу теплового баланса.

Таблица 5 – Сводная таблица теплового баланса проектируемой установки

Приход		Расход	
Потоки	Дж/кг	Потоки	Дж/кг
Тепло доломита	143,04	Тепло суспензии	38431,13
Тепло сульфата аммония	8701,6	Тепловые потери	2287,62
Тепло воды	2539,14	-	-

Продолжение таблицы 5

Тепло раствора	26681,29	-	-
Тепло пара	2287,62	-	-
Всего:	40718,75	Всего:	40718,75

При предлагаемой схеме в процессе тепло измельчение может быть использовано для исключения потребления пара резервуаром.

Тепло измельчения найдем по формуле:

$$Q_{\text{изм}} = G_2 * q_{\text{уд}} \quad (4)$$

Подставим значения в формулу

$$Q_{\text{изм}} = 25000 * 5200 = 130 \text{ МДж/кг}$$

Что эквивалентно 44 кг/ч водяного пара.

3.3 Расчет роторно-пульсационного аппарата

Рассчитаем параметры диспергатора.

Коэффициент быстроходности ротора определяется по формуле

$$n_s = \frac{3,65 \cdot n \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (5)$$

где n – частота вращения ротора, об/мин;

Q – производительность, м³/с;

H – напор, м.

Подставим значения в формулу:

$$n_s = \frac{3,65 \cdot 2950 \sqrt{\frac{8,26}{3600}}}{85^{0,75}} = 18,42$$

Критический кавитационный запас определяется по формуле

$$\Delta\eta_{кр} = \frac{1}{A} \left(\frac{P_a - P_n}{\rho} - g \cdot H_{BC} - h_{Tn} \right) \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

ρ – плотность обрабатываемой среды, кг/м^3 ;

P_a – давление на выходе, Па;

P_n – давление парообразования при заданной температуре, Па;

A – коэффициент запаса, принимаем равным 2;

H_{BC} – геометрическая высота всасывания, м;

h_{Tn} – гидравлические потери в прямом трубопроводе, м

Подставим значения в формулу

$$\Delta\eta_{кр} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 \cdot 10^6 - 0,87 \cdot 10^6}{0,1115 \cdot 10^4} - 9,81 \cdot 4 - 15 \right) = 3,6 \text{ м}$$

Допустимая частота вращения ротора определяется по формуле

$$n_{max} = \frac{C_{кр} \cdot \Delta\eta_{кр}^{3/4}}{31,15 \cdot Q^{1/2}} \quad (7)$$

где $C_{кр}$ – коэффициент быстроходности, выбирается в зависимости от рассчитанного nS , для МГКУ принимаем $C_{кр} = 1950$.

Подставим значения в формулу:

$$n_{max} = \frac{1950 \cdot 3,6^4}{31,15 \cdot 8,26^{1/2}} = 3658 \text{ об/мин}$$

Диаметр ротора определяется по формуле:

$$D = 2 \cdot k_{u2} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}}{\omega} \quad (8)$$

где k_{u2} – коэффициент окружной скорости;

ω – угловая скорость вращения ротора, рад/сек.

Коэффициент окружной скорости определяется по формуле

$$k_{u2} = 1 + 0,1 \cdot \left(\frac{n_s}{100} - 1 \right) \quad (9)$$

Подставим значения в формулу

$$k_{u2} = 1 + 0,528 \cdot \left(\frac{18,42}{100} - 1 \right) = 0,569$$

Угловая скорость вращения ротора определяется по формуле

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (10)$$

Подставим значения в формулу

$$\omega = \frac{3,15 \cdot 2950}{30} = 309,75 \text{ рад/сек}$$

Подставим значения в формулу

$$D_H = 2 \cdot 0,569 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 85}}{309,75} = 0,15 \text{ м}$$

Диаметр входного отверстия найдем по формуле

$$D_{\text{вх}} = D_2 / m \quad (11)$$

где m – относительный параметр, соответствующий значению коэффициента быстроходности от 10 до 20, $m = 1,95$.

Подставим значения в формулу

$$D_{\text{вх}} = \frac{0,15}{1,95} = 0,077 \text{ м} \quad (12)$$

Гидравлический коэффициент полезного действия определяется по формуле

$$\eta = 1 - \frac{0,42}{(\lg D_H^{0,64} - 0,172)^2} \quad (13)$$

Подставим значения в формулу

$$\eta = 1 - \frac{0,42}{(\lg 0,15^{0,64} - 0,172)^2} = 0,15$$

Определим необходимую мощность для организации процесса измельчения по формуле:

$$N_{\text{МГКУ}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (14)$$

Подставим значения в формулу

$$N_{\text{МГКУ}} = \frac{1,115 \cdot 9,81 \cdot \frac{8,26}{3600} \cdot 85}{\eta} = 14,22 \text{ кВт}$$

Примем запас мощности 20%

$$N_{\text{эл.дв.}} = 14,22 \cdot 1,2 = 17,1 \text{ кВт} \quad (15)$$

Выбираем стандартный двигатель мощностью 18,5 кВт.

Крутящий момент на валу ротора определяется по формуле:

$$M_{\text{кр}} = \frac{N_{\text{эл.дв.}}}{\omega} \quad (16)$$

где ω – угловая скорость вращения ротора ступени, рад/сек.

Подставим значения в формулу:

$$M_{\text{кр}} = \frac{18,5 \cdot 1000}{309,75} = 59,73 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Минимально допустимый диаметр вала ротора найдем по формуле:

$$d_0 = \frac{\sqrt{\frac{M_{\text{кр}}}{0,2 \cdot [Z_{\text{кр}}]}}}{100} \quad (17)$$

где $Z_{кр}$ – допускаемое значение напряжения на кручение для стальных валов, для вала МГКУ принимаем $Z_{кр} = 24 \text{ кг/см}^2$.

Подставим значения в формулу

$$d_0 = \frac{\sqrt{\frac{59,73}{0,2 \cdot 24}}}{100} = 0,035 \text{ м}$$

Учитывая припуск на шпоночный паз диаметр вала будет:

$$d_{в} = 1,04 \cdot 0,035 = 0,036 \text{ м}$$

Диаметр ступицы вала будет

$$d_{см} = 1,3 \cdot 0,036 = 0,047 \text{ м}$$

Расчетная производительность ротора определяется по формуле

$$Q' = \frac{Q}{\eta_{об}} \quad (18)$$

Подставим значения в формулу

$$Q' = \frac{8,26}{3600 \cdot 1,27} = 0,0018 \text{ м}^3/\text{с}$$

Скорость жидкости на входе в рабочую камеру определяется по формуле

$$C_0 = (0,03 - 0,08) \cdot \sqrt[3]{Q' \cdot n^2} \quad (19)$$

Подставим значения в формулу

$$C_0 = 0,06 \cdot \sqrt[3]{0,0018 \cdot 2950^2} = 1,5 \text{ м/с}$$

Диаметр выхода в ротор определяется по формуле

$$D_0 = \sqrt{D_n^2 + d_{cm}^2} \quad (20)$$

Подставим значения в формулу

$$D_0 = \sqrt{0,15^2 + 0,047^2} = 0,16 \text{ м}$$

Скорость потока на выходе рабочей камеры определяется по формуле

$$C_1 = \frac{4 \cdot Q'}{\pi(D_0^4 - d_{cm}^4)} \quad (21)$$

Подставим значения в формулу:

$$C_1 = \frac{4 \cdot 0,0018}{3,14 \cdot (0,16^4 - 0,047^4)} = 3,5 \text{ м/с}$$

Скорость смеси после выхода из рабочей камеры

$$C_2 = C_1 \cdot 0,77 \quad (22)$$

Подставим значения в формулу

$$C_2 = 3,5 \cdot 0,77 = 2,7 \text{ м/с}$$

Радиус средней точки лопатки ротора находится по формуле

$$R_0 \approx 0,8 \cdot D_0/2 \quad (23)$$

Подставим значения в формулу

$$R_0 \approx 0,8 \cdot \frac{0,16}{2} = 0,064 \text{ м}$$

Меридианальная составляющая скорости потока до стечения с лопасти равна скорости потока на выходе из рабочей камеры ротора:

$$C_M = C_2 = 2,7 \text{ м/с} \quad (24)$$

Конструкция тела лопаток смещает сечение выхода и соответственно изменяется меридианальная составляющая скорости потока. Это явления учитывается применением коэффициента, а само значение скорости находится по формуле:

$$C'_M = k_1 \cdot C_M \quad (25)$$

Примем коэффициент смещения равным 1,15 и подставим значения в формулу:

$$C'_M = 1,15 \cdot 2,7 = 3,1 \text{ м/с}$$

Окружная составляющая скорости потока на входе среды в ротор определяется по формуле

$$u_1 = \omega \cdot D_1/2 \quad (26)$$

Принимая диаметр входа среды в ротор равным диаметру

$$u_1 = 309,75 \cdot \frac{0,077}{2} = 11,9 \text{ м/с}$$

Окружная скорость среды на выходе из каналов ротора найдем по формуле:

$$u_2 = \omega \cdot D_2/2 \quad (27)$$

Подставим значения в формулу

$$u_2 = 309,75 \cdot \frac{0,15}{2} = 23,2 \text{ м/с}$$

Определим ширину лопасти по формуле

$$b_1 = Q/(\pi \cdot D_1 \cdot c_{r1} \cdot \mu) \quad (28)$$

Подставим значения в формулу

$$b_1 = \frac{8,26/3600}{3,14 \cdot 0,077 \cdot 0,46 \cdot 0,9} = 0,023 \text{ м}$$

Ширина лопасти на выход определяется по формуле:

$$b_2 = b_1 \cdot D_1/D_2 \quad (29)$$

Подставим значения в формулу

$$b_2 = 0,003 \cdot \frac{0,077}{0,15} = 0,012 \text{ м}$$

Угол между концом лопатки и касательной к окружности на входе в ротор найдем по формуле

$$\beta_{1к} = \operatorname{arctg} \left(\frac{c_1}{u_1} \right) + i \quad (30)$$

где i - угол атаки лопасти на входе, принимаем $i = 4^\circ$.

Подставим значения в формулу

$$\beta_{1к} = \operatorname{arctg} \left(\frac{3,9}{11,9} \right) + 4 = 22,1^\circ$$

Угол между концом лопасти и касательной к окружности на воде среды находится по формуле

$$\beta_{2к} = \beta_{1к} + 10^\circ \quad (31)$$

Подставим значения в формулу

$$\beta_{2к} = 22,1 + 10^\circ = 32,1^\circ$$

Наружный радиус ротора находится по формуле

$$R_2 = \frac{u_2}{\omega} \quad (32)$$

Подставим значения в формулу

$$R_2 = \frac{23,2}{309,75} = 0,075 \text{ м}$$

Оптимальное число лопаток определяется по формуле

$$Z = 6,5 \cdot \frac{R_2 + R_1}{R_2 - R_1} \cdot \sin \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \quad (33)$$

Подставим значения в формулу

$$Z = 6,5 \cdot \frac{0,075 + 0,03}{0,075 - 0,03} \cdot \sin \frac{22,1^\circ + 32,1^\circ}{2} = 6,9$$

Число лопаток выберем ближайшее большее четное число $Z=8$.

Толщину лопаток примем 5мм. Общий вид ротора показан на рисунке 26.

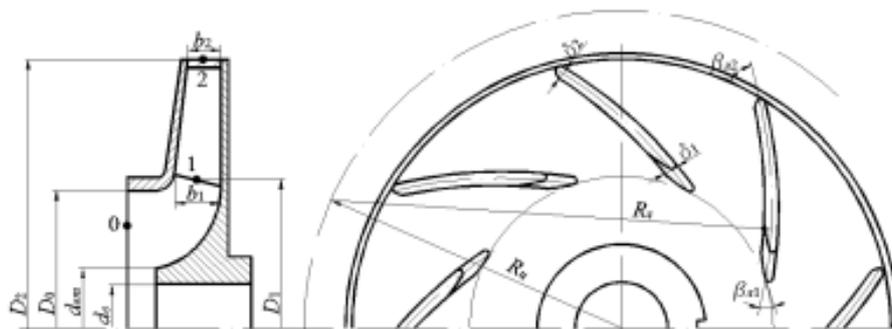


Рисунок 26 – Общий вид рассчитанного ротора диспергатора

Таким образом, для организации процесса тонкого измельчения сульфата аммония выбираем многоступенчатый кавитационно-гидроударный диспергатор с тремя ступенями измельчения, диаметром ротора 0,15м, мощностью привода 18,5 кВт. Внедрение диспергатора позволит добиться снижения потребления электроэнергии, пара, снизить потребление воздуха производством, снизить нагрузку на систему аспирации, упростить технологическую схему процесса.

Заключение

Описанное в работе использование многоступенчатого гидроударно-кавитационного устройства для измельчения кристаллов сульфата аммония в виде водной суспензии в процессе производства сульфат-нитрата аммония привело к ряду значительных улучшений в технологическом процессе.

Основным достижением внедрения этого устройства стало сокращение энергопотребления за счет удаления этапа сухого измельчения кристаллов сульфата аммония. Устранение дробилки и вспомогательного оборудования привело к существенному снижению расходов на электроэнергию, уменьшению потребления воздуха и упрощению системы аспирации. Потребляемая мощность снизилась более чем на 50 кВт. Использование водной суспензии для измельчения кристаллов сульфата аммония позволило сократить количество этапов производства, улучшить равномерность и качество конечного продукта. Это способствовало снижению времени производства и повышению эффективности всего процесса.

Избавление от этапа сухого измельчения привело к снижению объема пылевых выбросов в окружающую среду, что положительно сказалось на экологической чистоте производственного процесса и условиях труда персонала. Внедрение рассматриваемого диспергатора приведет к снижению износа и повышению надежности оборудования: Уменьшение механического воздействия на оборудование благодаря использованию гидроударно-кавитационного устройства может увеличить срок службы оборудования, снизить износ элементов и улучшить общую надежность производственной линии.

Эти позитивные эффекты внедрения многоступенчатого гидроударно-кавитационного устройства в технологический процесс производства сульфат-нитрата аммония свидетельствуют о его значительном вкладе в повышение эффективности, экономичности и устойчивости производства удобрений.

Список используемых источников

1. Анушенков А.Н. Многоступенчатое гидроударно-кавитационное устройство/ А.Н. Анушенков, И.В. Мещеряков // Научно-практический журнал «Научный вестник Норильского индустриального института». – Норильск. – 2013. – № 13. – С. 37-41.
2. ГОСТ 21560.2 – 82. Удобрения минеральные. Методы испытаний. – М.: Госстандарт, 1982, 30 с. 14. Методы анализа фосфатного сырья, фосфорных и комплексных удобрений, кормовых фосфатов / М.М. Винник, Л.Н. Ербанова, П.М. Зайцев и др. – М.: Химия, 1975, 213 с.
3. Завалин А.А., Шафран С.А., Чернова Л.С., Дубровских Л.Н. Новая форма азотного удобрения под яровую пшеницу // Плодородие. – 2009, №1, с. 19-20. 12. Завалин А.А., Шафран С.А., Чернова Л.С., Благовещенская Г.Г., Духанина Т.М., Байрамов Л.Э., Дубровских Л.Н. Оценка эффективности применения новой формы азотного удобрения // Агрохимия. – 2009, №12, с. 11-17.
4. Казаков А.И., Иванова О.Г., Курочкина Л.С., Плишкин Н.А. Кинетика и механизм термического разложения смесей нитрата и сульфата аммония // Журнал прикладной химии. – 2011. т. 84. № 9, с. 1465-1472.
5. Левин Б.В., Соколов А.Н. Проблемы и технические решения в производстве комплексных удобрений на основе аммиачной селитры. //Мир серы, N, P и K. – 2004, №2, с.13-21.
6. Мещеряков И.В. Перспективы применения гидроударно-кавитационного аппарата в промышленности / И.В. Мещеряков // Журнал «Вестник ИрГТУ». – Иркутск.– 2013. – № 12. – С. 219-222.
7. Мещеряков И.В. Некоторые процессы, происходящие в зазоре между ротором и статором многоступенчатого гидроударно-кавитационного устройства [Электронный ресурс] / И.В. Мещеряков // Электронный научный журнал «Исследования технических наук». – 2012. – № 4.

8. Патент №RU2628493 С2 Российская Федерация, МПК С05С1/00, Способ получения сульфатонитрата аммония : №2003104550/15 : заявл. 14.02.2014, опубликовано : 27.04.2004 / Абрамов О.Б., Афанасенко Б.П., Вандышев С.А., Дедов А.С., Дремов А.В. ОАО «Кирово-чепецкий химический комбинат имени Б.П. Константинова», 8 с. : ил. – Текст : непосредственный.

9. Патент №ВУ12423 С1 Республика Беларусь, МПК С05С13/00, Сульфат нитрат аммония : №а 20030595 : заявл. 14.11.2001, опубликовано : 30.10.2009 / Хайсмит Р.И., Коррил С.Т, Куидер Д.А., Хонейвелл интернешнл, – 10 с. : ил. – Текст : непосредственный.

10. Патент №RU200311746 7А Российская Федерация, МПК С05С1/00, Сульфат нитрат аммония : №2003117467/15 : заявл. 14.11.2001, опубликовано : 27.11.2004 / Хайсмит Р.И., Коррил С.Т, Куидер Д.А., Хонейвелл интернешнл, – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный.

11. Патент №RU2628493 С2 Российская Федерация, МПК С05С1/00, Способ получения сульфат-нитрата аммония : №2014132446 : заявл. 21.01.2021, опубликовано : 17.08.2017 / Барт С, Квидир Д., Азимова М.А., Виссингер Р.Г., Пейс К.Б., Хонейвелл интернешнл, – 10 с. : ил. – Текст : непосредственный.

12. Патент №RU2227792 С1 Российская Федерация, МПК С05С1/00, Сульфат нитрат аммония и способ его получения (варианты) : №2003104550/15 : заявл. 14.03.2014, опубликовано : 27.04.2004 / Абрамов О.Б., Афанасенко Б.П., Вандышев С.А., Дедов А.С., Дремов А.В. ОАО «Кирово-чепецкий химический комбинат имени Б.П. Константинова», – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный.

13. Патент №6689181 США. МПК С05 С 1/00. Сульфат-нитрат аммония / Highsmith R.E., Kweeder J.A., Correale S.T. – Оpubл. 10.02.2004 – РЖХим 2004, № 19 (II).

14. Патент №RU2279416 С2 Российская Федерация, МПК С05С1/00, Сульфат нитрат аммония и способ его получения (варианты) :

№2003117467/15 : заявл. 14.11.2001, опубликовано : 10.01.2006 / Хайсмит Р.И., Коррил С.Т, Куидер Д.А., Хонейвелл интернешнл, - 10 с. : ил. - Текст : непосредственный.

15. Позин М.Е. Технология минеральных солей. Часть II. – Л.: “Химия”, 1970, 1558 с.

16. Позин М.Е., Зинюк Р.Ю. Физико-химические основы неорганической технологии: Учеб. Пособие для вузов. – Л.: Химия, 1985. – 384 с.

17. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М.А. Промтов. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 260 с.

18. Ростовцев В.И. Научное обоснование и разработка интенсифицирующих методов энергетических воздействий на твёрдую и жидкую фазы труднообогатимого минерального сырья: автореф. дис... д-ра техн. наук / В.И. Ростовцев. – Чита: ЗабГУ, 2012. – 40 с.

19. Таран А.Л., Шмелев С.Л., Олевский В.М., Кузнецова В.В., Рустамбеков М.К., Филонов А.М., Таран А.В. Исследование возможности гранулирования в башнях аммиачной селитры с добавкой сульфата аммония // Химическая промышленность. – 1991, № 12, с. 743-749.

20. Таран А.Л., Конохова Н.В. Исследование процесса и разработка технологии производства NS – содержащего минерального удобрения в грануляционных башнях // Успехи в химии и химической технологии. – 2009, т. 23, № 7, с. 72-75.

21. Таран А.Л., Конохова Н.В., Таран Ю.А., Яковлев Д.С. Проверка адекватности математического описания процесса гранулирования аммиачной селитры с сульфатом аммония в качестве наполнителя в башнях по ходу реального процесса // Химическая промышленность сегодня. – 2011, № 6, с. 21-27.

22. Чернышев А.К., Левин Б.В., Туголуков А.В., Огарков А.А., Ильин В.А. Аммиачная селитра: свойства, производство, применение – М.: ЗАО «ИНФОХИМ», 2009. – 544 с.

23. Biskupski A., Kolaczowski A., Masal C., Schroeder J., Simonides J., Sorich B. The influence of additives on the decomposition of ammonium nitrate. I. Effect of chlorine, sulfate, nitrite ions // Pr. Nauk. Inst. technol. nieorg. i nawoz. miner. PWrocl. – 1981, №22, 15-30.
24. Bałdyga J., Orciuch W., Makowski L., Malik K. Dispersion of Nanoparticle Clusters in a Rotor-Stator Mixer Ind. Eng. Chem. Res. 2008, 47, 3652-3663
25. Doucet L., Ascanio G., Tanguy P.A. Hydrodynamics Characterization of Rotor-Stator Mixer with Viscous Fluids Eng. Chem. Res. 2018, 17, 2857-2869
26. James J., Cooke M., Trinh L., Hou R., Martin P., Kowalski A., Rodgers T.L. Scale-up of batch rotor–stator mixers. Part 1-power constants Chemical Engineering Research and Design Volume 124, August 2017, Pages 313-320
27. Tang Shuang-Ling, Lü Chun-Xu, Zhou Xin-Li, Wang Yi-Lin, Liu Zu-Liang. Study of modified ammonium nitrate II. Analysis of inorganic fertilizers // Chin. J. Appl. Chem. – 2004, 21, № 4, 400-404.

Приложение А

Технологическая схема отделения концентрирования

