

УДК 66.099.2

Макаренков Д.А., Назаров В.И., Гонопольский А.М., Трефилова Я.А.
Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)
(Университет машиностроения)

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ГРАНУЛИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ШИХТ СО ВТОРИЧНЫМИ МАТЕРИАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА*

D. Makarenkov, V. Nazarov, A. Gonopolskiy, Y. Trefilova
Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI)
(Mechanical Engineering University) (Moscow, Russia)

CHOICE OF THE GRANULATING EQUIPMENT OF MULTICOMPONENT POLYDISPERSE MIXTURES WITH SECONDARY MATERIAL RESOURCES ON THE BASIS OF THE SYSTEM ANALYSIS

Аннотация. Процессы получения гранулированных многокомпонентных полидисперсных шихт (МПШ), содержащих отходы, методами окатывания и прессования рассматриваются как сложная химико-технологическая система. Выделены семь подсистем, характеризующих процесс получения гранулированного материала. На основании комплексного подхода к процессу гранулирования МПШ были разработаны и внедрены на производствах технологические линии производства гранулированных материалов, таких, как эмалевые и стеклообразующие шихты, органо-минеральные удобрения, ферментные препараты, твердотопливные гранулы и отходы полимерных материалов.

Ключевые слова: гранулирование, параметр, технологическая схема, гранула, технологический процесс.

Abstract. Processes of producing waste-containing granulated multicomponent polydisperse charges (MPCs) by the methods of compaction and pelletizing are considered as a complex chemical-engineering subsystem. Seven subsystems, characterizing the process of obtaining the granulated material, are demonstrated. On the basis of a comprehensive approach to the MPC granulation process, technological production lines of the granulated materials, such as enamel and glass charges, organo-mineral fertilizers, fermental preparations, solid propellant granules and polymeric material wastes, have been developed and introduced.

Key words: granulation, parameter, technological scheme, granule, technological process.

Процессы гранулирования в настоящее время широко применяются в таких отраслях промышленности, как химическая, нефтехимическая, строительная, фармацевтическая, пищевая и др. Совершенствование техники гранулирования представляет собой комплексную проблему, охватывающую различные научные области. Её решение осуществляется при такой постановке задачи, которая рассматривает линию гранулирования как совокупность процессов и аппаратов, объединенных в один комплекс. Процессы, протекающие в отдельных аппаратах, влияют друг на друга, что учитывается системным анализом. Исходными установками системного анализа являются: учет входных и выходных характеристик объекта и междисциплинарный подход к решению проблем управления как на стадии исследований, так и конструкторских разработок [2].

Процесс гранулирования вместе со стадиями подготовки шихты являются химико-технологической системой (ХТС). Анализ такой системы связан с декомпозицией её подсистем

© Д.А. Макаренков, В.И. Назаров, А.М. Гонопольский, Я.А. Трефилова, 2013.

*Работа выполнена в рамках Государственного контракта №14.527.12.0023 от 20 октября 2011 года (шифр 2011-27-527).

и элементов, с выявлением их устойчивых взаимоотношений. На первой стадии декомпозиции проводят математическое моделирование отдельных подсистем (макроисследование). На второй — микроисследование элементов подсистем, что включает изучение процессов в аппаратах и машинах [3]. С этих позиций рассмотрим процессы получения гранулированных материалов из многокомпонентных полидисперсных шихт (МПШ), содержащих отходы, методами окатывания и прессования как ХТС. Для этого проведем её декомпозицию. В технологию окатывания входят следующие процессы:

- получение гранулированных МПШ таких ферментных препаратов, как молокосвертывающие и глюколюкс-Е, фармацевтические препараты (абомин, лактозим), пивная дробина на тарельчатых аппаратах;
- получение гранулированных стеклообразующих шихт в барабанных аппаратах;
- получение органоминеральных и калимагниевого удобрений в турболопастных скоростных грануляторах окатывания (ТЛСГ).

К прессовому гранулированию МПШ можно отнести:

- получение лекарственных препаратов лактозима и абомина методом таблетирования;
- получение эмалевых и стеклообразующих шихт, природных и искусственных цеолитов, микроталька и диоксида титана методом компактирования (на валковых прессах);
- получение методом прокатки на роторных грануляторах с плоской матрицей топливных гранул (на основе растительных и древесных отходов), а также топливных брикетов на основе многокомпонентной шихты, содержащей технический углерод (пирокарбон), аммиачную селитру и опилки, и адсорбентов на основе шихты из шунгита и пирокарбона;
- получение красителей природного происхождения методом виброгранулирования.

При разработке процесса гранулирования шихт, содержащих до 30% твердых или пас-

тообразных отходов, необходимо получать целевые продукты с комплексом заданных характеристик при минимуме энергетических и экономических затрат. Часто требуемые свойства получаемых гранул заложены в составе материала, поэтому выбранная технология гранулирования должна обеспечить максимально возможное проявление этих свойств. Например, при прессовании древесных отходов на роторном грануляторе с плоской матрицей, оснащенной термонагревателями, при её нагреве из материала выделяются смолы и лигнины, которые способствуют его пластифицированию и снижают энергозатраты [5].

Следует отметить, что процессы химической технологии подразделяются на физические (идущие без изменения молекулярного состава вещества) и химические (идущие с изменением молекулярного состава перерабатываемых веществ). Гранулирование полидисперсных шихт и порошков, состоящих из большого числа разнородных по физико-химическим свойствам материалов, характеризующихся различным содержанием упругих, хрупких, пластичных, гигроскопичных компонентов и наличием различных специальных добавок, представляет собой совокупность различных процессов. При гранулировании рассмотренных выше материалов происходят как физические, так и химические процессы, развивающиеся под действием энергии, сообщаемой материалу рабочими органами машин (например, валками в валковых прессах, лопатками в грануляторах окатывания или помольными шарами в вибрационных смесителях). При этом изменяются реологические свойства материала. В отдельные группы должны быть выделены процессы ввода компонентов (связующего), отвода конечных продуктов, а также процессы контроля и регулирования качества продукции.

Таким образом, гранулирование МПШ — это совокупность процессов направленного формирования гетерогенной системы (гранул), целью которого является максимально возможное проявление ценных свойств, присущих материалу, при наименьших эко-

номических и энергетических затратах, с обеспечением требований экологической безопасности. Заметим, что протекающие в шихте процессы изменения фазового состояния при формировании гетерогенных систем взаимосвязаны. Так, например, причиной низкой прочности на раскалывание гранул из стеклообразующих и эмалевых шихт на основе отходов может быть увеличение количества связующего. Хотя это и придает системе пластичность, однако приводит к формированию непрочного каркаса гранулы.

Применим методологию системного анализа и будем рассматривать гранулирование МПШ как химико-технологическую систему, причем включим в систему и ту часть среды, с которой происходит обмен: исходные компоненты, энергетические воздействия, средства подвода механической энергии к компонентам, целевые и побочные продукты. Затем проведём декомпозицию ХТС на ряд взаимосвязанных подсистем (этапов гранулирования), каждая из которых допускает дальнейшую детализацию, и осуществим построение ее первичной топологической системы. При этом будем рассматривать совокупность физико-механических эффектов (ФМЭ), протекающих при гранулировании, а также сопутствующих процессов смешения и измельчения в объеме всего аппарата. Так, в скоростном турболопастном грануляторе окатывания при получении органоминеральных и калимагниевого удобрений, в зависимости от положения направляющих лопастей и их количества и частоты вращения протекают процессы смешения, гранулирования и дезинтеграции, что приводит к получению монодисперсного удобрения пролонгированного действия.

В ХТС гранулирования МПШ выделим следующие подсистемы: 1 — совокупность состава шихты и свойств исходных материалов; 2 — совокупность способов и средств подготовки компонентов шихты; 3 — способы подачи исходных материалов в гранулирующее оборудование; 4 — совокупность энергетических воздействий и средств подачи энергии к материалам; 5 — совокупность,

развивающихся ФМЭ в процессе гранулирования; 6 — выбор технологических схем гранулирования МПШ и конструкций аппаратов; 7 — методы контроля и регулирования качества гранул.

Подсистема № 1, с одной стороны, характеризует разработанный состав шихты, анализ её свойств и подготовки компонентов, а с другой — определяет характер всех последующих этапов получения шихты (рис. 1). Она представляет не что иное, как объекты исследования, которыми при анализе гранулирования являются обрабатываемые МПШ. Разработка состава шихты представляет два взаимосвязанных этапа: разработку качественного и количественного состава и нахождение оптимальных соотношений компонентов. В работе был проведён комплексный анализ получения целевых материалов и свойств основных типов МПШ. Как правило, при получении целевых гранулированных продуктов они имеют различный химико-минералогический состав. Термодинамическая неустойчивость порошков, из-за неравномерного распределения влаги в их объеме, их способность к взаимодействию со связующим с последующим структурообразованием определяют характер протекания процесса гранулирования. Для порошков строительного назначения проведена их классификация по реологическим и прочностным характеристикам, химическому составу и их технологическим свойствам [10]. При гранулировании МПШ важнейшими характеристиками целевого продукта как дисперсной системы являются размеры гранулы, её форма и гранулометрический состав. От природы и свойства вещества зависят молекулярные силы аутогезии, возможность структурообразования с образованием конденсационно-кристаллизационного каркаса гранулы, фрикционные свойства. Шероховатость поверхности определяет в итоге силу сцепления частиц, площадь контактной поверхности. Поверхностные свойства индивидуальных частиц влияют на все составляющие аутогезионных сил и определяют возможность формуемости и прессуемости материала.

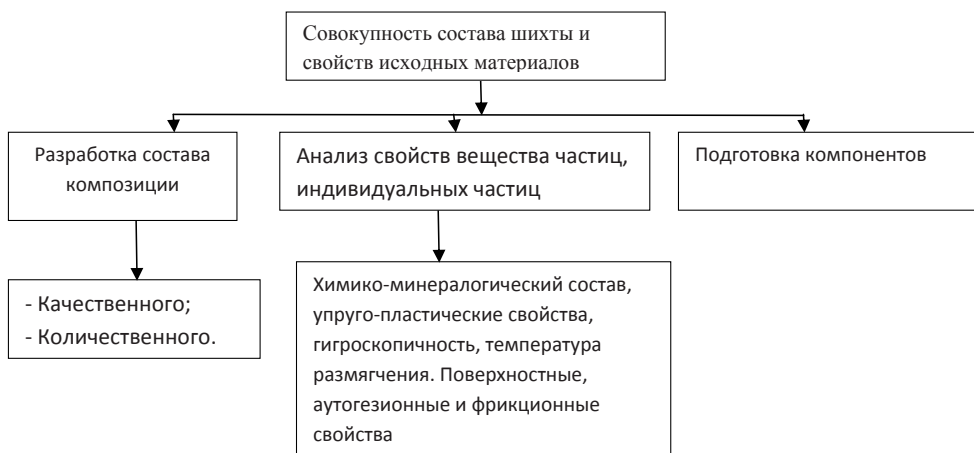


Рис. 1. Подсистема №1 «Совокупность состава шихты и свойств исходных материалов»

В подсистеме № 2 «Способы и средства подготовки компонентов» (рис. 2). Они определяются типом, их агрегатным состоянием компонентов и исходной влажностью. Так, например, в производстве гранулированных органоминеральных удобрений необходимо учитывать высокую исходную влажность ($W_{исх} = 35 \div 45\%$) низинного торфа, который является основным компонентом шихты. Наиболее сложными объектами исследования являются полидисперсные шихты и порошки с большим числом разнородных по физико-химическим свойствам материалов, содержащие гигроскопичные, упругие и пластичные компоненты. Одни материалы имеют минимальную исходную влажность, а в другие

необходимо вводить дополнительное количество связующего. Исходный состав шихты определяет физические и химические изменения при её подготовке. Большой интерес представляют исследования по изучению фазовой структуры при механическом воздействии. По результатам исследований структурно-деформационных и реологических свойств шихты можно получить заданный набор характеристик шихты, соответствующий параметрам требуемой реологической модели среды и регулировать свойства шихт на разных стадиях переработки [6]. Это позволяет выбрать наиболее технологичный метод гранулирования.

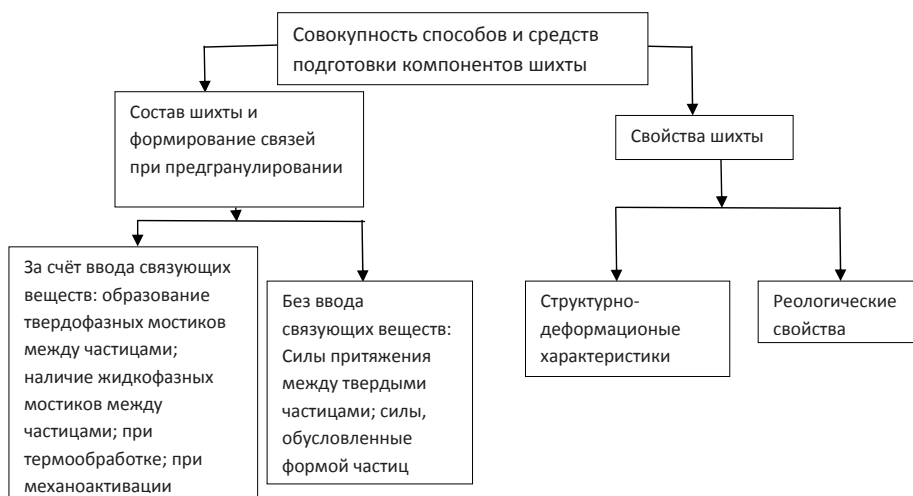


Рис. 2. Подсистема №2 «Совокупность способов и средств подготовки компонентов»

Подсистема № 3 охватывает подготовительные операции, к которым относятся стадии транспортировки, загрузки и дозирования материалов. Эффективность этих операций определяется такими характеристиками материалов, как угол естественного откоса, коэффициент сцепления, сыпучесть. Для этой подсистемы важен порядок ввода исходных материалов, связующих, а также технологические приемы для получения монодисперсного гранулируемого материала. Способы подачи отдельных компонентов могут быть периодическими и непрерывными. Их выбор определяется свойствами порошкообразного материала и, следовательно, характером процесса гранулирования. При этом может осуществляться либо полное смешение всех компонентов шихты, либо последовательное введение каждого из компонентов. Так, в производстве ОМУ осуществляются такие последовательные операции, как сортировка и классификация торфа, его предварительное смешение на шнековых транспортерах с солями NPK (азот, фосфор, калий) и подача шихты в гранулятор при одновременном вводе связующего в виде раствора микроэлементов. Технологические, аутогезионные, фрикционные свойства порошкообразного материала должны учитываться при конструировании средств подачи компонентов и оборудования в целом. Например, при производстве компактированной стекольной и эмалевой плитки используют комплексное воздействие. Бункер валкового пресса оснащается подпрессовывателем, с одновременным последующим нагревом в очаге деформации подаваемой шихты. При окатывании молокосвертывающих ферментных препаратов на тарели она оснащается дополнительным устройством (активатором) для дезагломерации гранул, что приводит к выравниванию грансостава продукта. При скоростном гранулировании окатыванием ОМУ и водорастворимых удобрений, на вал гранулятора устанавливаются разные типы лопаток (проталкивающие, смешивающие, дезинтегрирующие) для получения монодисперсных гранул (крупки).

Подсистема № 4, которая определяет энергетику процесса гранулирования, является одним из центральных звеньев общей ХТС (рис.3). Она включает в себя элементы, посредством которых энергия вводится в очаг деформации гранулирующего устройства и проводится механоактивация компонентов. Под энергетическими воздействиями в данной подсистеме понимаются первичные воздействия, передаваемые от элемента машины к материалу. Например, от вала пресса к компактируемой шихте, от прокатывающего ролика роторного гранулятора к слою шихты, от шнека экструдера к пробке материала, от лопаток вала турболопастного гранулятора к динамическому слою шихты; от пуансона к шихте в канале матрицы таблеточной машины. В ряде случаев такие воздействия не приводят сразу к образованию гранул материала, но вызывают вторичные эффекты, например деаэрацию воздуха при компактировании [1]. Энергетические воздействия могут быть как комбинированными, так и простыми. Так, предварительное смешение компонентов ферментных препаратов и ОМУ в смесителях гравитационного типа является простым, а обработка наполнителей из диоксида титана или талька в вибросмесителях, в сочетании с их механоактивацией и дезагрегацией помольными шарами или высокоплотным бисером — комбинированным.

Условия подачи энергии к компонентам — это совокупность технологических режимов и конструктивных параметров гранулирующего оборудования, многообразие которых вызвано существованием многочисленных способов и средств реализации процесса гранулирования МПШ. К таким технологическим режимам относятся скорость вращения рабочих органов, температура материала, коэффициенты внутреннего и внешнего трения при компактировании на валках. Конструктивными параметрами являются геометрия аппарата, тип и конструкция дробящего органа его расположение (угол атаки) относительно вала аппарата, наличие отбойных и транспортирующих устройств и т. д. Так, в аппаратах скоростного типа (турболопаст-

ной гранулятор — смеситель) в зависимости от его конструктивных параметров, режимов работы и требований к конечному продукту (например, ОМУ) могут быть реализованы процессы измельчения, смешения и гранулирования как по отдельности, так и их комбинации. В них входят измельчение со смешением, измельчение с гранулированием. Такие режимные параметры, как коэффициент за-

полнения аппарата шихтой, частоты вращения лопаток вала, форма лопасти и их угол наклона (атаки) определяют как скорость и число соударений гранул, так и время пребывания. То есть они являются динамическими характеристиками процесса гранулирования, измельчения и смешения.



Рис. 3. Подсистема № 4 «Совокупность энергетических воздействий и средств подачи энергии к материалам»

Установлено, что при угле направляющих лопастей гранулятора 15° (угол атаки) в динамическом слое движущегося материала происходит максимальное число соударений между частицами материала, что приводит к получению прочных гранул ОМУ. Чем больше соударений между частицами, тем больше время их пребывания в аппарате, тем плотнее образующиеся частицы. Так, в режиме смешения окружная скорость вращения лопаток гранулятора составляет от 1,0 м/с до 1,5 м/с. При увеличении скорости лопаток до $(20 \div 30)$ м/с механизм гранулообразования резко меняется. В аппарате реализуется как процесс дезинтегрирования, так и гранулообразования. Преобладает ударный эффект, что приводит к меньшему расходу связующего и получению однородного плотно-прочного продукта.

Условия подачи энергии к компонентам могут быть оценены по интенсивности и эффективности воздействия. Интенсивность характеризуется величиной воздействия на этапе предгранулирования по энергии, затрачиваемой непосредственно на механоактивацию единицы массы материала в единицу времени. При механоактивации стеклообразующих шихт, ОМУ, ферментных препаратов подведенная энергия расходуется для создания упругих и пластических деформаций в частицах, что приводит к получению материала с новыми структурно-деформационными и реологическими свойствами. Упругая деформация частиц характеризуется образованием в них трещин, развивающихся из макродефектов. На вновь образованной активированной поверхности сразу после её образования протекают процессы, снижающие

поверхностную активность шихты, такие, как химические реакции с образованием цементирующих связей и солевых мостиков в массе, адсорбция газов на поверхности частиц. При механоактивации стеклообразующих и эмалевых шихт меняется форма частиц, удельная поверхность частиц, газопроницаемость и нарушается упорядоченность кристаллической решетки, что позволяет получать материал при меньших давлениях прессования. Необходимо отметить, что условия подачи энергии к компонентам неразрывно связаны с совокупностью средств подачи компонентов. Средства подачи энергии к компонентам могут представлять как отдельные смесительно-измельчающие машины, так и их совокупность в сочетании с вспомогательными устройствами, обеспечивающие интенсификацию процесса механоактивации.

Энергетический баланс в турболопастных грануляторах можно записать как

$$E = E_{\text{дг}} + E_{\text{эм}} + E_{\text{эп}} \quad (1),$$

где: $E_{\text{дг}}$ — энергия на дезинтеграцию-гранулообразование; $E_{\text{эм}}$ — энергия механоактивации; $E_{\text{эп}}$ — энергозатраты прочие.

Подсистема № 5 «Совокупность ФМЭ развивающихся при гранулировании», характеризует физико-химические процессы, вызванные энергетическими воздействиями, внесением связующих и поверхностно-активных веществ в шихту к компонентам. Все это многообразие в зависимости от вида обработки шихты можно разделить на три группы процессов: развивающиеся в массе компонентов; развивающиеся на границе раздела компонентов; развивающиеся на границе раздела материала и рабочих органов оборудования. ФМЭ, развивающиеся в массе компонентов, могут инициироваться методами механоактивации, которые позволяют влиять на поверхность материала. Ввод в гетерогенную шихту различного рода связующих и ПАВ инициирует эффекты, которые могут развиваться на границе раздела фаз. Так при взаимодействии твердых частиц и

связующего типа воды действует механизм адсорбции. В результате происходит более полное смачивание их поверхности и уменьшение межчастичного трения, что снижает твердость частиц. Это позволяет уплотнять стеклообразующие шихты и золошлаковые композиции при меньших давлениях компактирования.

К процессам, развивающимся в объеме МПШ, относятся разрушение частиц шихты, тепловыделение в массе материала, увеличение реакционной способности компонентов (из-за изменения рН), протекание твердофазных реакций в объеме материала, а также изменения адгезионных (степень заполнения объема, прочность при разрыве, сжатии, сдвиге) и технологических (истираемость, стойкость к воздушной эрозии) свойств. Наличие реакционноспособных компонентов в объеме МПШ позволяет использовать методы механоактивации на начальных стадиях процесса гранулирования. Степень активации зависит от энергонапряженности активатора, соотношения между помольными шарами к шихте, количества и состава добавок, а также от типа активных элементов механоактиватора. Установлено, что при механоактивации строительных порошков возможно получать изделия, не уступающие по качеству материалам пластического формования [10]. Использование приемов механоактивации при производстве ОМУ на основе торфа, лигносульфонатов и цеолитов позволяют инициировать протекание реакций с гуминовыми кислотами, увеличивать содержание лимонно-растворимого P_2O_5 в составе удобрений [7].

Из явлений, развивающихся на границе раздела компонентов, могут быть названы: образование химических и физических связей между компонентами шихты и связующим, межфазные явления в объеме МПШ. При этом основное назначение технологических связующих — повышение пластичности и связности агломерируемых порошков и обеспечение необходимой прочности, уплотняемости и формуемости материала. При гранулировании методом

компактирования пористых порошков (перлит, пермаит), обладающих повышенным водопоглощением, от 100 до 300%, применяли комбинированные добавки, которые гидрофобизируют поверхность материала, образуя «сетчатое покрытие» [8]. В качестве гидрофобизатора был использован полиалкилгидросилоксан — полимер (кремнеорганическая добавка — КОД), содержащий реакционноспособные связи и лигнопан Б-1. При обработке перлита данной добавкой происходит взаимодействие частиц перлита с поверхностными группами ОН с образованием химически фиксированной пленки, которая обволакивает частицы пористого материала. Использование комбинированной добавки, позволяет «перевести» пористый пылевидный порошок в гранулы, которые обладают определенным пределом прочности. Полученный материал, в ходе его обработки связующим, «переходит» в новое реологическое состояние, которое характеризуется пластической прочностью, сыпучестью и укрупнением грансостава.

К явлениям, развивающимся на границе взаимодействия материала и рабочих органов оборудования, относятся адгезионные явления и износ рабочих органов валков или лопастей. Так, при гранулировании стеклообразующих шихт проводится предварительная пластификация для уменьшения трения материала о поверхность валков. При гранулировании ОМУ в ТЛСГ внутри корпуса аппарата размещают проталкивающие и транспортирующие лопасти. При этом вал гранулятора совершает возвратно-поступательное движение, что снижает эффект налипания материала на стенки аппарата. Для ведения процесса гранулообразования в «тонком» динамическом слое движущихся частиц уменьшают степень загрузки материала.

Подсистема № 6 «Выбор технологических схем гранулирования МПШ и конструкций аппаратов» отражает технологию гранулирования МПШ методами компактирования, прокатки на роторных прессах с плоской матрицей, окатывания в скоростных и тарельчатых грануляторах и характеризует

конструкционно-технологические параметры гранулирующего оборудования.

Подсистема № 7 «Методы контроля и регулирования качества гранул» характеризует входной и выходной контроль качества исходных материалов, шихты и гранул в технологии гранулирования МПШ. Так, на этапе подготовки оцениваются такие параметры, как модуль формуемости, плотность материалов, реологические характеристики и удельная поверхность. Эффективность процесса гранулирования характеризуется структурно-деформационными и прочностными характеристиками. Разработанная топологическая схема гранулирования и детализация её совокупностей позволяют выделить наиболее существенные факторы, влияющие на свойства конечного продукта и определить диапазон теоретических и экспериментальных исследований. Совокупность оборудования линии гранулирования обеспечивает стадии технологического процесса превращения набора компонентов в гранулированный материал с заданными свойствами. Причем значимость отдельных этапов при установлении общих закономерностей процесса гранулирования не одинакова. Свойства конечного целевого продукта формируются при гранулировании за счёт физических и химических превращений, инициируемых совместным действием механоактивации и вводимых в МПШ связующих. Проведенный выше анализ стадий подсистем процесса гранулирования позволяет осознанно подходить к выбору метода гранулирования, определять (задавать) наиболее существенные параметры процесса, характеризующие физико-химические процессы подсистем в текущий момент времени. На основании комплексного подхода к процессу гранулирования МПШ были разработаны и внедрены на производствах технологические линии производства гранулированных материалов. Так, проведенные исследования по определению структурно-деформационных и реологических параметров эмалевых и стеклообразующих шихт позволили разработать структурную и технологическую схему учас-

тка компактирования (рис. 4). Технологическая схема включает смеситель (1), транспортер шихты (2), промежуточный бункер (3) с электромагнитным вибратором 4, патрубки (5) с шиберными задвижками (6), валковый пресс (9) с загрузочным бункером (8), лен-

точные транспортеры (2 и 7), транспортёр готового продукта (10) и предохранительная сетка (11). В схеме предусмотрена аспирационная установка, состоящая из циклона, рукавного фильтра с хвостовым вентилятором (на рис. не показано).

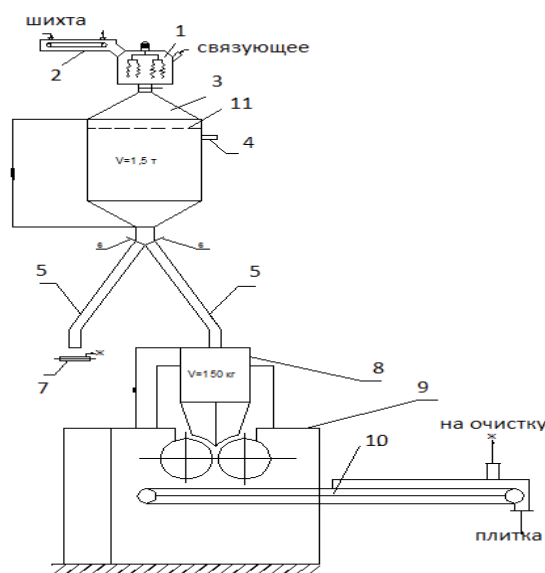


Рис. 4. Технологическая схема участка компактирования эмалевых и стеклообразующих шихт

Выделим, по аналогии с работой [4], входные, управляющие, возмущающие и выходные параметры:

– входные параметры: гранулометрический и химический состав шихты, насыпная плотность шихты, минералогический состав шихты, химическая однородность шихты по CaCO_3 , диаметр валков, зазор между валками, частота вращения валков, направление прокатки шихты;

– управляющие параметры: плотность шихты после утряски или подпрессовывания, скорость прокатки, среднее нормальное напряжение, влажность шихты, коэффициент внешнего трения при контакте шихты с поверхностью валка, коэффициент внутреннего трения, форма выполнения поверхности валков, сыпучесть шихты, пластическая прочность, коэффициент бокового давления, связующие вещества, температура шихты перед компактированием, протекание твердофаз-

ных и обменных реакций между компонентами шихты, охлаждение компактированной шихты, сушка или спекание компактированной шихты;

– возмущающие параметры: климатические условия, линейный износ рабочей поверхности валков, вид износа, попадание в зазор между валками инородных предметов;

– выходные параметры: плотность плитки, размеры плитки, гранулометрический состав раздробленной плитки, предел прочности плитки на раскалывание, химический состав плитки, пористость плитки.

Так, например, шихты с малой насыпной плотностью (ферментные препараты $\rho_{\text{нас}} = 300 \div 400 \text{ кг/м}^3$, ОМУ с $\rho_{\text{нас}} = 700 \text{ кг/м}^3$) имеют низкую сыпучесть, что не позволяет их транспортировать в зону гранулирования прессующего оборудования. Поэтому предпочтительнее их гранулирование методом окатывания, где не требуется высокая сыпу-

честь материалов. С другой стороны, отходы тетра-пак (вторичные полимернаполненные композиционных материалы) подвергаются дополнительной агломерации, где они приобретают высокую сыпучесть, что дает возможность их гранулирования методом вальцевания или экструдирования с термонагревом. Схема участка гранулирования ОМУ методом окатывания, реализованная в условиях Буйского химического завода, приведена на рис. 5. Эта схема содержит турболопастной скоростной гранулятор окатывания, узел сушки, классификации и дробления нето-

варной фракции. Особенностью скоростного гранулятора является конструкция лопаток, обеспечивающая образование динамического слоя частиц движущегося по спирали на внутренней цилиндрической поверхности аппарата. Материал, перемещающийся в слое, можно представить в виде совокупности «пакетов» частиц. Объем пакета частиц определяется геометрическими размерами и формой лопаток. Механизм и кинетика гранулообразования ОМУ описываются на основе анализа поэтапного процесса изменения исходной дисперсной структуры МПШ.

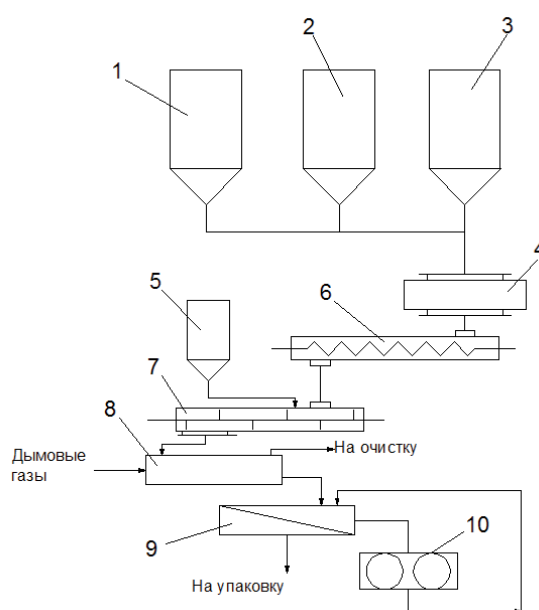


Рис. 5. Схема участка гранулирования ОМУ:

- 1 — бункер ретура; 2,3 — бункера исходного сырья; 4 — смеситель; 5 — емкость для связующего;
6 — питатель-дозатор; 7 — скоростной гранулятор; 8 — барабанная сушилка;
9 — виброгрохот; 10 — дробилка.

К сложным МПШ относятся молокозвешивающие ферментные препараты (МФП) и лекарства на их основе. Эти препараты являются термолабильными, и для разработки технологических схем были проведены комплексные исследования процессов гранулирования. При этом определяли физико-химические и реологические свойства исходных компонентов, подбирали технологические связующие и условия их подачи, режимы процесса гранулирования, выявляли механизм гранулообразования и лимитирующие стадии процесса.

Исследования показали, что гранулирование МФП лучше проводить методом окатывания в тарельчатом грануляторе. Перед окатыванием следует проводить подготовку исходных компонентов. Соль и ферменты необходимо доизмельчать, а затем увлажнять и механоактивировать в предгрануляторе. Производительность установки гранулирования может меняться от 30 до 100 кг/ч. Схема гранулирования МФП приведена на рис. 6.

Процесс происходит следующим образом. Исходные МФП и соль подаются на шаровую

мельницу (1). После помола готовая смесь с заданным гранулометрическим составом перегружается в бункер (2), снабженный дозатором. Часть порошкового продукта из него подается в предгранулятор-смеситель (3), где образуются влажные агломераты с $W_{исх} = 10\%$ (ретур). Этот ретур подается на тарель вместе с другой частью порошкового фермента. В присутствии связующего (7%-ный раствор поливинилгидролидона (ПВП)) происходит образование гранул и их окатывание до сферической формы. Если процесс гранулирования идет в непрерывном режиме, то конструкция тарели позволяет после роста гранул до определенного размера выводить их из гранулятора. Влажный гранулированный продукт после сушки подается на рас-

сев в виброгрохот (7), набор сит, где продукт рассеивается на товарную фракцию (0,5-2 мм) и нетоварный продукт. Товарный продукт подается на узел упаковки, а нетоварные фракции (мелкие и крупные гранулы) возвращаются на вход схемы в мельницу (1). Связующие готовят в емкости с мешалкой, используя в качестве растворителя дистиллированную воду. Емкость оснащена рубашкой для подогрева, так как для растворения ПВП требуется повышенная температура. Мелкодисперсный распыл связующего обеспечивает пневматическая или центробежная форсунка. Для снижения количества агломерированных гранул на тарели установлен рамочный активный орган.

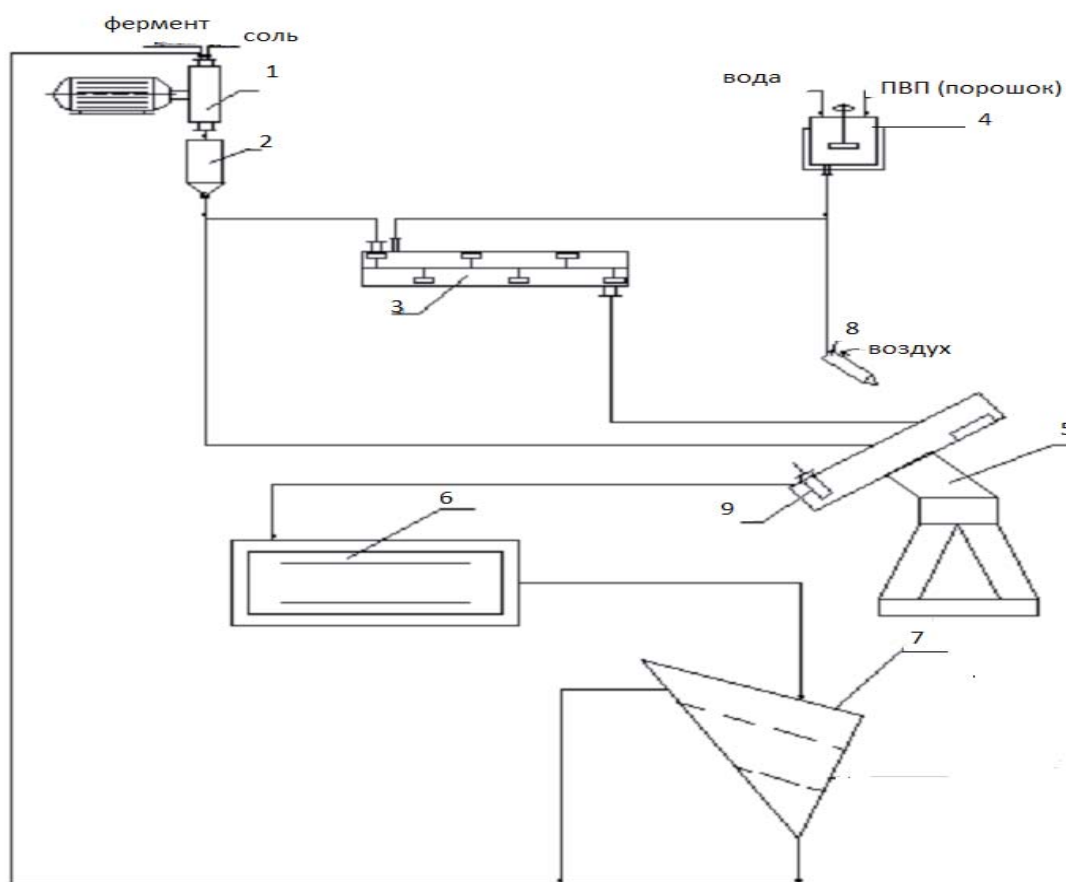


Рис. 6. Технологическая схема процесса гранулирования МФП методом окатывания на тарели:
 1 — шаровая мельница; 2 — бункер; 3 — предгранулятор-смеситель; 4 — узел приготовления связующего;
 5 — тарель-гранулятор; 6 — сушилка; 7 — виброгрохот; 8 — пневматическая форсунка;
 9 — рамочный активный орган.

Ряд препаратов выпускают в таблетированном виде. Так, например, смесевая композиция сычужного фермента и пепсина выпускаются под торговой маркой «Алтазим лекарственный», препарат на основе МФП выпускается в таблетированной форме под названием «Абомин». Разработанная нами схема их производства приведена на рис.7а. При получении таблетированного абомина к нему добавляют крахмал, кальций стеариновокислый и ванилин. После их смешения в смесителе до однородной массы вводят связующее (крахмальный клейстер). Полученную смесь сушат в поддонах до влажности 0,1-1,5 масс.%. Конечная влажность таблеточной

смеси определяется количеством вводимого хлористого кальция и исходной влажности всей смеси. После сушки образовавшийся спек дробят до получения сыпучего порошка однородного фракционного состава. Затем готовую смесь подают в питатель таблет-машины. Готовые таблетки подаются на упаковку в блистеры. Схема приготовления МФП «Алтазим» (рис. 7б.) аналогична получению «абомина». Отличие состоит в режимных параметрах процесса. Сушку проводят в мягком режиме при температуре 40-80 °С до влажности 0,1-1% масс. Измельчение проводят в мельнице ударно-ножевого типа. В обеих схемах используется одна таблет-машина.

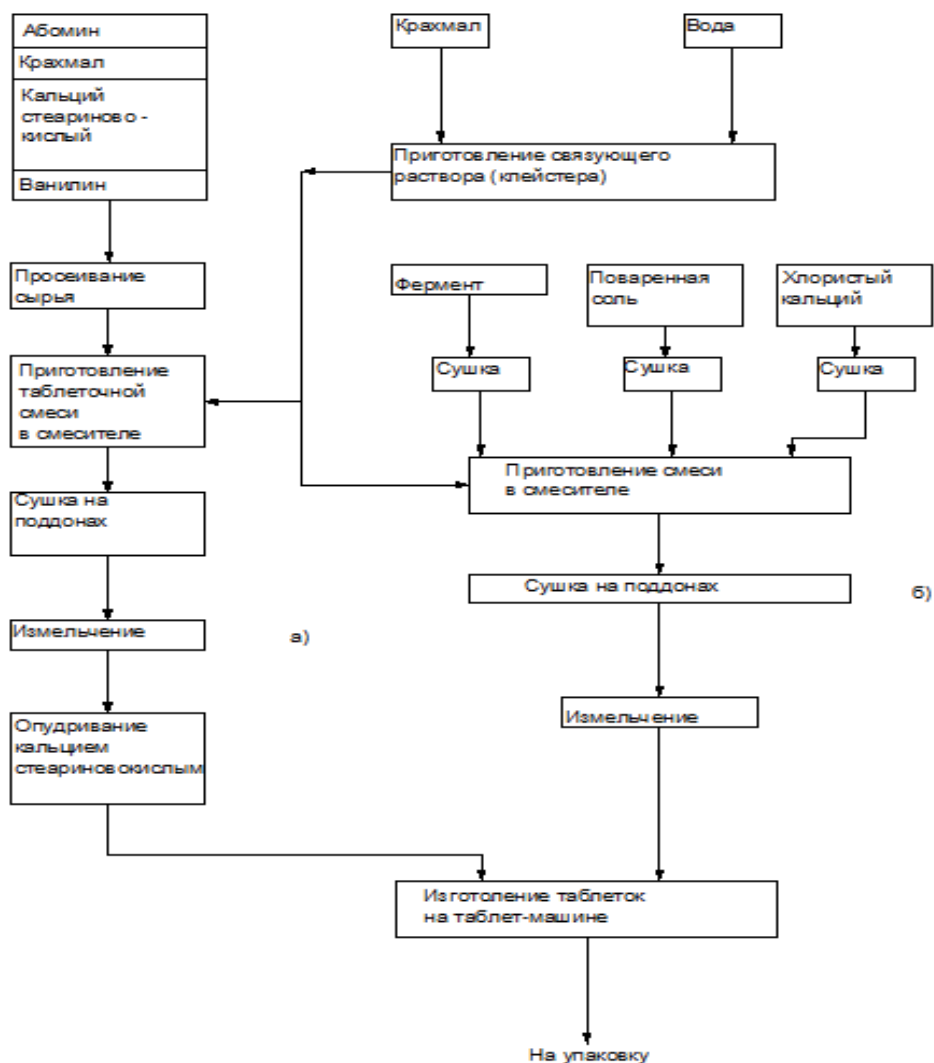


Рис. 7. Принципиальная схема получения таблетированного абомина (а) и алтазима (б)

Одним из направлений утилизации биомассы является их гранулирование в топливо. Если технология гранулирования топливных гранул из опилок хорошо отработана, то гранулирование твердотопливных композиций из смесей древесных, растительных и органических отходов в практическом плане не решена. Проведенные нами комплексные исследования процесса гранулирования та-

ких материалов, как опилки, лузга, торф, пивная дробина, технический углерод позволили разработать технологическую схему (рис. 8) и определить режимные параметры при прокатке на роторном грануляторе с плоской матрицей. В процессе производства можно выделить определяющие стадии: измельчение, сушка, доизмельчение, обработка связующим и гранулирование прокаткой.

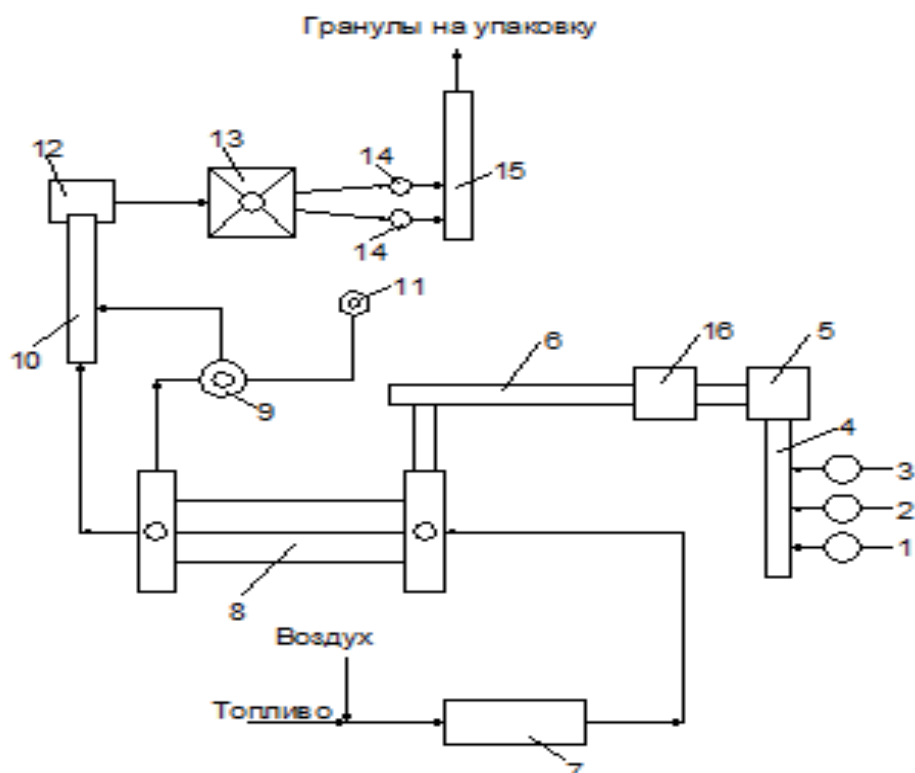


Рис. 8. Технологическая схема получения твердотопливных гранул на основе отходов:
 1,2,3 — бункера сырья; 4 — ленточный транспортер с металлодетектором; 5 — смеситель;
 6 — ленточный конвейер; 7 — топка; 8 — барабанная сушилка; 9 — циклон;
 10 — транспортер с обдувом; 11 — дымовая труба; 12 — дезинтегратор;
 13 — бункер мелкодисперсного сырья; 14 — роторный гранулятор;
 15 — транспортер; 16 — дробилка

В разработанной схеме исходное сырье (опилки, щепка, лузга, торф, углерод) из бункеров (1, 2 и 3) подается транспортером (4) в смеситель (5), а потом в дробилку (16), и в сушилку (8). После сушки смесь подвергается дополнительному измельчению в дезинтеграторе (12), а затем подается в бункер накопитель (13). Подготовленная смесь через

дозатор поступает в роторный гранулятор с плоской матрицей (14), откуда готовые гранулы после охлаждения на транспортере (15) подаются на упаковку. Оптимизация процесса гранулирования смеси из МПШ достигается при выполнении ряда мероприятий. При измельчении древесного сырья рубительные машины (дробилки) измельчают сырье до

фракций не более 25×25×2 мм. При любом типе сушильного устройства необходимо более мелкое измельчение до 6 мм. Для этого используют молотковые измельчители или дезинтеграторы. Если гранулируется только древесное сырье, то влажность должна быть не менее 8 %, которая достигается за счет использования пара или ввода связующего. При получении твердотопливных композиций из МПШ (состав см. выше) необходимо при дополнительном помоле обеспечить размер сырья в диапазоне (0,5-3) мм. В канале матрицы роторного гранулятора температура сырья достигает (70-90) °С, и в процессе его движения образуется жидкая пластифицирующая фаза [5]. В результате гранулируемая среда переходит из сыпучей в сыпуче-пластичную. При этом снижаются усилия прессования при сохранении высокой прочности топливных гранул.

Методы управления реологическими свойствами разнородных по своей структуре материалов позволили разработать технологию переработки отходов полимерных материалов, в том числе пленочных и картонно-бумажных, таких, как упаковка «тетра-пак» [9]. Аппаратурное оформление такой схемы с получением вторичных полимернаполненных композиционных материалов (ВПКМ) методами валкового прессования и экструдирования приведено на рис. 9. На первой стадии вторичная упаковка «тетра-пак» подвергается дроблению с последующим разделением на бумагу и пленку. Затем при подаче пленки в реактор за счет химической реакции с реагентами происходит отделение алюминиевой фольги. Эти стадии на схеме не приведены. В технологической линии производства товарных полупродуктов можно выделить 4 отделения. В I-ом отделении бумагу измельчают в роторно-ножевом дезинтеграторе (1), а затем после дробления в молотковой дробилке (2) подают в агломератор (10). Дробление и агломерирование полиэтиленовой пленки проводят в устройствах (4) и (5) отделения II. В отделении III происходит совместное агломерирование бумаги и измельченной пленки полиэтилена.

Подготовленная смесь перед вальцеванием и экструдированием дополнительно нагревается в смесителе (12). Изготовление листовых материалов проводят в валковом прессе (15) с подпрессователем (14). Резку листовых материалов, подаваемых устройством (17), осуществляют ножевым устройством (18). Изготовление гранул и погонажных изделий (уголки, профили) проводят в отделении IV. Смесь из горячего смесителя (12) подают в экструдер (20), где проводится нагрев и пластификация материала. Из головки (22) выходят прутковые заготовки (стренги), которые затем проходят через ванну охлаждения (25) и устройство обдува (26). Охлажденные стренги попадают в устройство резки (26), где происходит их измельчение в гранулы. Затем они собираются в бункере (28). На различных стадиях получения полупродуктов ВПКМ используются связующие (бункера 6 и 8) и наполнитель (бункер 9). Бумага и пленка транспортируются конвейерами (7,3,11,13, 16 и 19). Для вырубki изделий из листового ВПКМ предусмотрен режущий штамп.

Сложность получения из отходов бумаги и полиэтиленовой пленки плотно-прочного композиционного материала ВПКМ методами вальцевания и экструдирования объясняется различиями их реологических свойств. Если отходы полиэтилена низкой плотности хорошо плавятся и переводятся в вязкотекучее состояние при температуре 130 °С, то отходы бумаги в чистом виде не становятся пластичными. Стандартный набор операций по их совместному измельчению и агломерированию не позволяет получать предгранулы, обладающие требуемой сыпучестью и способностью пластифицироваться при нагреве. Анализ подсистемы «Совокупность ФМЭ развивающихся при гранулировании» (рис. 6) показал, что реологические свойства смеси можно оптимизировать, проведя совместный процесс механоактивации и смешения с вводом связующего и наполнителя. Эти процессы осуществляются в аппарате горячего смешения (рис. 9).

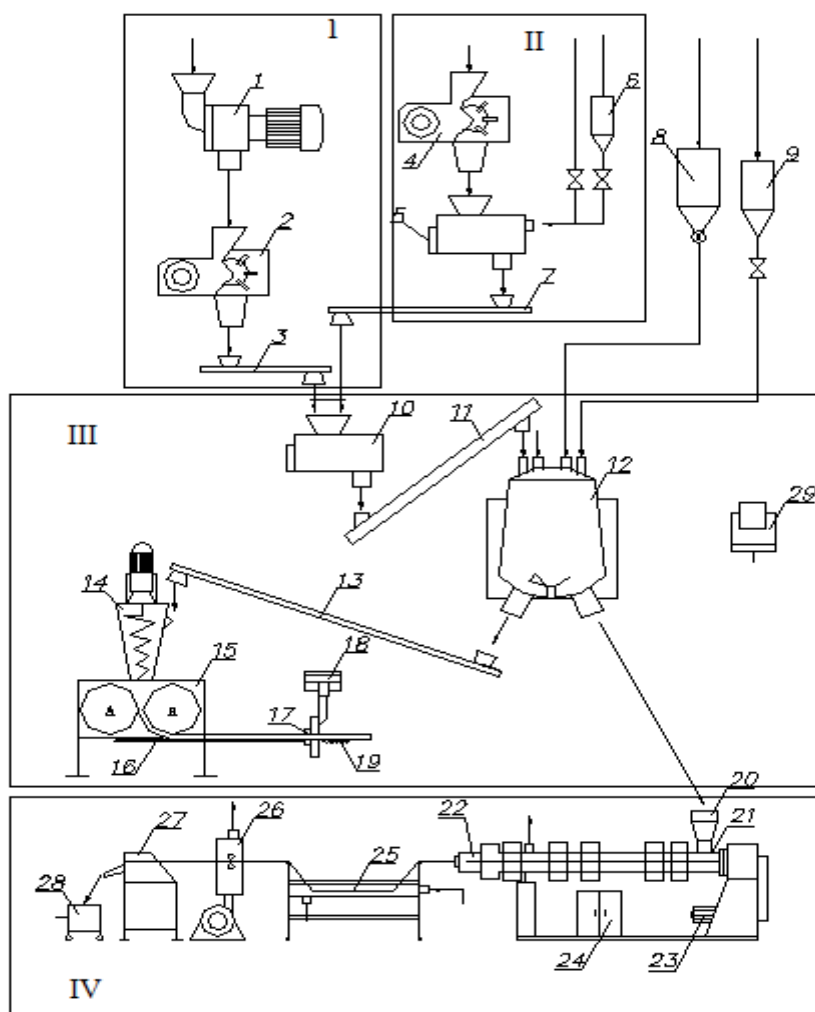


Рис. 9. Технологическая схема линии производства товарных полупродуктов из ВПКМ:
 I — линия переработки бумаги; II — линия переработки плёнки;
 III — отделение вальцевания; IV- отделение экструзии

Таким образом, проведенный в работе системный анализ процессов гранулирования МПШ позволил выделить 7 подсистем, охватывающих физико-химические и реологические свойства шихт, стадии их подготовки, а также технологические, конструктивные и энергетические параметры аппаратного оформления этих процессов. С учётом этого были разработаны типовые технологические линии производства гранулированных материалов. Анализ входных, управляющих, возмущающих и выходных параметров показал, что их совокупность позволяет выбрать оптимальную технологическую схему гранулирования МПШ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Генералов М.Б. Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии: учебное пособие для вузов. — Калуга: Издательство Н. Бочкарёвой, 2002. — 592 с.
2. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов. — М.: Наука, 1985. — 440 с.
3. Классен П.В., Гришаев И.Г. Основные процессы технологии минеральных удобрений. — М.: Химия, 1990. — 340 с.
4. Назаров В.И., Мелконян Р.Г., Калыгин В.Г. Техника уплотнения стекольных шихт. — М.: Легпромбытиздат, 1985. — 128 с.

5. Назаров В.И., Булатов И.А., Макаренков Д.А. Особенности разработки процесса прессового гранулирования биотоплива на основе растительных отходов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2009. — № 2. — С. 35-39.
6. Назаров В.И., Макаренков Д.А. Управление процессами грануляции полидисперсных шихт и порошков методами компактирования и окатывания на основе реологических моделей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2005. — № 1. — С. 6-9.
7. Назаров В.И., Макаренков Д.А., Данилов А.К., Баринский Е.А. Исследование механоактивации минеральных удобрений на основе отходов и местных ресурсов в процессах скоростного гранулирования // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. — 2004. — № 4 (13). — С. 15-22.
8. Назаров В.И., Макаренков Д.А., Фам Ван Ау. Особенности процесса гранулирования порошков с малой насыпной плотностью и пористой структурой // Тезисы докладов IV международного симпозиума молодых ученых, аспирантов и студентов «Техника и технология экологически чистых производств». — М.: МГУИЭ, 1999. — 24.1.
9. Николайкина Н.Е., Скопинцев И.В., Гонопольский А.А. Технология утилизации многослойной упаковки пищевых продуктов для получения полимернаполненных композиционных материалов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2010. — № 3. — С. 42-44.
10. Сулименко Л.М., Альбац Б.С. Агломерационные процессы в производстве строительных материалов. — ВНИИЭСМ, 1994. — 297 с.