

УДК 661.152.3'1/9-91(045)

Высоцкая Н.А.¹, Францкевич В.С.²¹ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», г. Солигорск, Беларусь²УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь**ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ ШИХТЫ КОМПЛЕКСНЫХ УДОБРЕНИЙ**

Аннотация. Представлены некоторые особенности использования NPK-удобрений. Описан процесс подготовки шихты для гранулирования. Проиллюстрирована линия по производству сложно-смешанных удобрений, и описан процесс получения удобрений. Механизм гранулирования методом окатывания состоит из четырех стадий: смешение исходного порошка с частицами ретур и связующим; образование гранул из мелких частиц и дробление комков; окатывание и уплотнение гранул; стабилизация структуры гранулы. Установлено, что на всех стадиях происходит распределение частиц по размерам. Интенсивность распределения зависит от свойств продукта, технологии, аппаратурного оформления процесса гранулирования и др. Отмечено, что с увеличением содержания влаги физико-механические свойства (гигроскопичность, слеживаемость) гранул значительно ухудшаются.

Ключевые слова: влага, гранулы, гранулирование, комков, окатывание, ретур, шихта.

Vysotskaya N.A.¹, Frantskevich V.S.²¹JSC "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", Soligorsk, Belarus²Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus**MOISTURE CONTENT OF THE CHARGE OF COMPLEX FERTILIZERS**

Abstract. Some features of the use of NPK-fertilizers are presented. The process of preparing a charge for granulation is described. The line for the production of complex-mixed fertilizers is illustrated, and the process of obtaining fertilizers is described. The mechanism of granulation by the pelletizing method consists of four stages: mixing the initial powder with recycle particles and a binder; formation of granules from small particles and crushing of lumps; pelletizing and compaction of granules; stabilization of the granule structure. It was found that at all stages there is a particle size distribution. The intensity of distribution depends on the properties of the product, technology, hardware design of the granulation process, etc. It is noted that with an increase in moisture content, the physical and mechanical properties (hygroscopicity, caking) of granules are significantly deteriorated.

Keywords: moisture, granule, granulation, lump, pelletizing, recycle, charge.

Введение. Во многих отраслях промышленности (химической, металлургической, пищевой, строительных материалов, и др.), а также в сельском хозяйстве широкое применение получили гранулированные материалы [1, 2].

Правильно выбранные методы и условия гранулирования обеспечивают получение готового продукта с требуемыми качественными показателями. В настоящее время изучены, разработаны и освоены в промышленности разнообразные схемы гранулирования с применением аппаратов различных по конструкции и по принципу действия. Процессы гранулирования минеральных удобрений разнообразны как по методам их осуществления, так и по аппаратурному оформлению.

Получение высоких и стабильных урожаев сельскохозяйственных культур часто возможно лишь при создании оптимальной системы питания растений и, прежде всего, за счет применения удобрений [3]. В настоящее время в химической промышленности

получили широкое распространение процессы гранулирования тонкодисперсных порошков. При этом в качестве связующих используют различные вещества, отличающиеся своей природой и свойствами [4]. Установление взаимодействия раствора связующего с компонентами тукосмеси при формировании гранул КС1 является сложной задачей, т.к. в процессе гранулирования и сушки на поверхности и внутри гранул происходит образование новых фаз и кристаллических соединений, которые являются рентгеноаморфными и не поддаются анализу.

НРК – универсальное азотно-фосфорно-калийное минеральное удобрение, содержащее все основные питательные элементы, которые обеспечивают сбалансированное питание растений. Некоторые особенности использования НРК-удобрений:

- позволяет осуществлять индивидуальный подбор норм и способов внесения удобрения в зависимости от определенной культуры и почвы, путем выбора подходящего соотношения компонентов;

- добавление антислеживающих добавок обеспечивает длительное сохранение всех свойств удобрения: повышается сыпучесть и замедляется растворение, что значительно сокращает потерю азота при орошении [5].

Во многих случаях при гранулировании сложных и сложно-смешанных удобрений ретур (мелкая фракция) вводится в грануляционный аппарат для поддержания оптимальной влажности и обеспечения максимального выхода товарной фракции.

В некоторых случаях, при гранулировании суперфосфата методом окагивания в присутствии влаги, ретур не требуется, однако он образуется в процессе гранулирования. В этих случаях стремятся вести процесс с минимальным выходом ретура.

К безретурным методам гранулирования относится отверждение капель плава потоком воздуха или в масле [6].

Приготовление шихты для гранулирования. В технологический поток исходных компонентов добавляется ретур (некондиционный по грансоставу готовый продукт из технологического процесса).

Сухая смесь, состоящая из исходных компонентов, пыли и ретура, элеватором подается на двухвальный смеситель. Смеситель представляет собой горизонтальное корыто U-образного сечения, в котором вращаются в противоположных направлениях два параллельных вала. На валах укреплены перемешивающие и транспортирующие лопатки.

В смесителе происходит интенсивное перемешивание компонентов, увлажнение и образование шихты за счет подачи технической воды и/или абсорбционных стоков, подогрев шихты за счет подачи водяного пара. Образующиеся в процессе газоочистки отходящих газов абсорбционные стоки подаются в смеситель из бака насосом или несколькими насосами.

Расход технической воды и/или абсорбционных стоков и пара регулируется в необходимом количестве, оптимальном для образования шихты требуемой влажности и температуры.

В смеситель могут подаваться растворы сульфата аммония и гидрогумата (регулятора роста).

Приготовление раствора сульфата аммония производится на установке, состоящей из двух баков с мешалками, центробежных насосов, трубопроводов и запорной арматуры. Предусмотрен подогрев растворов в баках подачей пара в змеевики теплообменников. Приготовление раствора сульфата аммония производится поочередно в одном из баков – в одном готовится раствор, а из второго раствор подается в технологический процесс. Центробежные насосы также работают поочередно – один работает на циркуляцию при приготовлении раствора, второй подает раствор в процесс. Процесс приготовления раствора сульфата аммония включает следующие операции:

- набор в бак воды до уровня 70 %;
- открытие подачи пара на подогрев;
- включение привода мешалки;
- загрузка сульфата аммония (производится путем поднятия мешков с сульфатом аммония при помощи грузоподъемного механизма и выгрузки мешков в бак сверху);
- доведение до верхнего уровня раствора в баке путем подачи воды в бак;
- включение насоса по циркуляционной схеме после достижения заданной температуры раствора в баке;
- после достижения минимального уровня раствора во втором баке производится перевод насоса по схеме подачи раствора в технологический процесс из первого бака с приготовленным раствором.

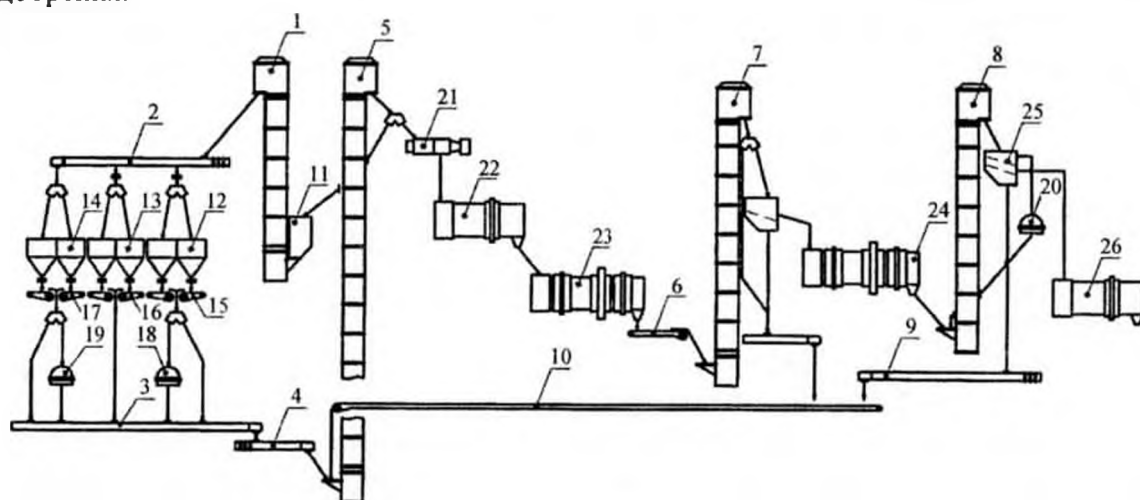
Приготовление раствора гидрогумата производится на установке, состоящей из двух баков с мешалками, центробежных насосов, трубопроводов и запорной арматуры. Предусмотрен подогрев растворов в баках подачей пара в змеевики теплообменников.

Приготовление и подача в технологический процесс раствора гидрогумата производится также, как и раствора сульфата аммония, по аналогичной схеме, за исключением операции загрузки в бак. Гидрогумат в жидком виде из бочек загружается через верхний люк баков.

Регулирование расхода растворов сульфата аммония и гидрогумата выполняется регулирующими электрическими задвижками.

Линия по производству сложно-смешанных НРК-удобрений. Особенностью технического решения является то, что в линии для получения сложно-смешанного удобрения, содержащей связанное транспортирующими механизмами оборудование, включающее бункеры, дозаторы, дробилки, смеситель, барабан-гранулятор, барабан-сушилку, барабан-холодильник, грохот и барабан-кондиционер, барабан-гранулятор установлен на опорной платформе, выполненной с возможностью регулировки угла наклона барабана-гранулятора посредством гидроцилиндров, а загрузочная камера барабана-гранулятора выполнена в виде шнекового загрузчика.

На рисунке 1 представлен общий вид линии для получения сложно-смешанного удобрения.



1, 5, 7, 8 – элеваторы; 2, 3, 4, 6, 9, 10 – конвейеры; 11-14 – бункеры; 15-17 – дозаторы; 18-20 – дробилки; 21 – смеситель; 22 – барабан-гранулятор; 23 – барабан-сушилка; 24 – барабан-холодильник; 25 – грохот; 26 – барабан-кондиционер
Рисунок 1. – Линия для получения сложно-смешанного удобрения

Линия для получения сложно-смешанного удобрения работает следующим образом. Исходные компоненты, например, мелкозернистый KCl, карбамид, аммофос, суперфосфат, наполнитель, поступающие из загрузочного бункера, посредством транспортирующих механизмов подаются в промежуточные бункеры и затем в дозаторы соответственно. Компоненты, требующие измельчения, предварительно дробятся в дробилках, и далее все компоненты транспортирующими устройствами подаются в смеситель, куда также поступает сульфат аммония. Полученная в смесителе влажная шихта поступает в загрузочный патрубок шнекового загрузчика, который подает шихту во внутреннее пространство корпуса барабана-гранулятора, обеспечивая при этом равномерность и однородность потока поступающей влажной шихты. Заданная производительность барабана-гранулятора обеспечивается углом его наклона в сторону выгрузки, который выбирают в пределах от 1 до 3°, определяя экспериментально оптимальный угол для конкретного гранулометрического состава продукта, и устанавливают посредством изменения угла наклона опорной платформы. В барабане-грануляторе происходит окатывание исходной шихты, а отгранулированная шихта поступает в барабан-сушилку, а затем посредством транспортирующих механизмов в барабан-холодильник, затем элеватором в грохот. Крупную фракцию измельчают в дробилке. Дробленый материал вместе с мелкой фракцией в качестве ретур возвращают в технологический процесс посредством транспортирующих устройств. Готовый продукт обрабатывается в барабане-кондиционере антислеживателем [7].

Механизм гранулирования. Гранулирование – совокупность физико-химических и физико-механических процессов, обеспечивающих получение частиц определенной формы, размеров и прочности и сопровождающихся уплотнением структуры вещества.

Гранулирование методом окатывания состоит из четырех стадий:

1 – смешение исходного порошка с частицами ретур и связующим;

2 – образование гранул из мелких частиц и дробление комков;

3 – окатывание и уплотнение гранул;

4 – упрочнение связей в результате перехода жидкой фазы в твердую (стабилизация структуры гранулы).

На всех стадиях происходит распределение частиц по размерам. Интенсивность распределения зависит от свойств продукта, технологии, аппаратного оформления процесса гранулирования и др.

Стадии смешения и образования гранул. Связующими выступают различные жидкости, способствующие сцеплению частиц. Чаще всего используют дешевые вещества, (вода, плав одного из компонентов, раствор продукта).

Характер капиллярного взаимодействия в слое сыпучего материала определяется количеством воды в точке контакта, формой контакта и числом контактов в единице объема материала.

При минимальном содержании в сыпучем материале мелких фракций зазоры между крупными зёрнами остаются почти свободными. Поэтому сравнительно высокое среднеэффективное расстояние между частицами способствует снижению прочности сцепления. С увеличением содержания мелких фракций структура материала становится более плотной, это приводит к возрастанию прочности гранул. Положительная роль крупных фракций заключается в том, что они создают своеобразный скелет образца, обладающий хорошим сопротивлением воздействию статических и динамических нагрузок, а определенное количество мелких частичек уменьшает среднее расстояние между крупными зёрнами, и возникает сила сцепления, препятствующая изменению жесткой структуры слоя. Только при определенном соотношении крупных и мелких

частиц получается наиболее плотная упаковка и достигается наиболее высокая сила сцепления их в увлажненном материале.

Порошок, поступающий на гранулирование, имеет однородный гранулометрический состав. Крупные частицы поступают с ретуром, прошедшим обкатку и сушку и отсеянным от продукта. Из-за различной структуры частицы ретура и порошка по-разному смачиваются жидкостью. Скорость капиллярного всасывания определяется такими свойствами жидкости, как вязкость, плотность, поверхностное натяжение и свойствами материала – радиусом капилляров, природой вещества, состоянием его поверхности.

Процесс образования зародыша и формирования гранулы при подаче жидкости в гранулятор имеет следующий вид: капля воды, попавшая в слой материала, под действием капиллярных сил незамедлительно начинает распространяться во все стороны, заполняя при этом поры между отдельными частицами. Наибольший размер образующихся комков прямо пропорционален величине капли и обратно пропорционален пористости слоя материала. Вода перестает распространяться в сыпучем материале, как только комок достигнет предельной капиллярной влагоемкости. Это время измеряется несколькими секундами. Для увлажнения частиц ретура требуется намного больше времени.

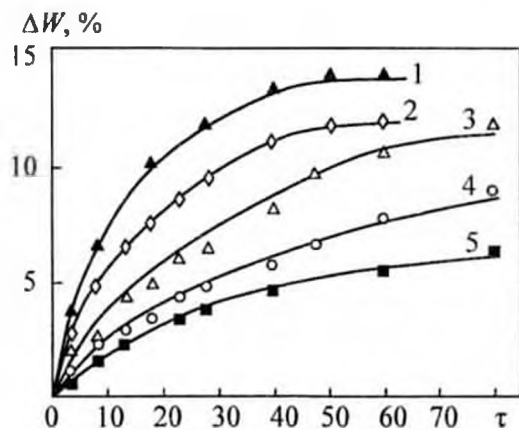
Кривые поглощения влаги гранулами двойного суперфосфата диаметром 2-4 мм, помещенными в слой шихты различной влажности W с размером частиц 0,1-0,3 мм, представлены на рисунке 2.

Скорость приращения влагосодержания в грануле тем выше, чем больше влагосодержание порошка и меньше прочность гранул. В начальный период времени τ влага поглощается гранулами наиболее интенсивно.

Изменение характера влагопоглощения с течением времени связано с тем, что вначале влага поглощается поверхностным слоем гранул под действием капиллярных сил. По мере насыщения этого слоя влага просачивается внутрь гранулы, где имеются открытые и закрытые поры, заполненные воздухом. Далее поглощение влаги резко замедляется и ограничивается растворением воздуха в жидкой фазе. Чем выше влагосодержание порошка, тем более интенсивно насыщается поверхностный слой гранул и тем скорее наступает переход от одного характера влагопоглощения к другому.

При увлажнении порошка под действием капиллярных сил одновременно происходит и уплотнение. Чем мельче частицы и больше поверхностное натяжение жидкости, тем плотнее агломерат. Таким образом, при увлажнении порошка двойного суперфосфата пористость агломерата, образованного вокруг капли, такая же, как и гранулы. Образовавшийся агломерат далее уплотняется окатыванием.

Окатывание. Уплотнение частиц методом окатывания происходит при ударе о стенку гранулятора или о неподвижный слой материала. Большая часть кинетической энергии, которую получает комок при скатывании вниз, расходуется на уплотнение гранулы и перемещение зерен. Должен существовать минимальный размер влажного



- 1 – прочность гранул 2 МПа, $W = 21,2\%$;
 2 – прочность 2 МПа, $W = 18,5\%$;
 3 – прочность 2 МПа, $W = 15,5\%$;
 4 – прочность 3 МПа, $W = 15,5\%$;
 5 – прочность 4 МПа, $W = 15,5\%$

Рисунок 2. – Кривые поглощения влаги гранулами двойного суперфосфата с различной прочностью

комка, при котором он обладает достаточной кинетической энергией во время ссыпания. Если масса комка меньше критической величины, то приобретенной энергии не хватит для уплотнения.

Комки в результате неоднократных ссыпаний и ударов уплотняются, отдельные частицы, перемещаясь, укладываются более плотно. При этом избыточная влага вытесняется на поверхность комка, в результате чего становится возможным дальнейшее присоединение к комку сухих частиц. По мере приближения частиц друг к другу толщина пленок связанной воды уменьшается, а прочность сцепления становится больше.

При работе гранулятора внутри комка формируется определенная минимальная толщина водных пленок, равная величине динамических нагрузок. При достижении этой толщины дальнейшее выделение воды на поверхность комка прекращается, гранула прекращает расти, ее прочность достигает максимума для данного режима.

Наличие в шихте сухих плотных частиц ретура приводит к тому, что влага не только всасывается во внутрь, но и выдавливается на поверхность. При одинаковых интенсивностях этих процессов гранулы не растут, а при преобладании всасывания над другими процессами происходит измельчение гранул, поскольку ослабевают связи между частицами. Для дальнейшего увеличения размера гранул окатыванием на поверхность извне следует вводить дополнительное количество жидкости. При большом содержании ретура в шихте и однократном увлажнении на его поверхности создается временный избыток жидкой фазы, в результате чего происходит рост гранул, хотя этого количества жидкости недостаточно для устойчивого ведения процесса гранулирования. Далее частицы ретура продолжают впитывать в себя жидкость. По истечении определенного времени на поверхности частиц ретура жидкости уже не хватает, и агломераты разрушаются.

Однократное введение требуемого количества жидкости приводит к чрезмерному увеличению влажности шихты и образованию крупных агломератов. Для получения гранул требуемого размера шихту необходимо увлажнять постепенно с учетом кинетики влагопоглощения. В большинстве случаев, время насыщения гранул влагой намного превышает время, необходимое для окатывания гранул при заданных динамических нагрузках. Для поддержания на поверхности гранул оптимальной влажности следует производить увлажнение шихты весь период окатывания.

В момент перекатки гранулы через зерно мелкой фракции происходит толчок в направлении центра гранулы. Развивающееся при этом давление достигает сотен атмосфер и способствует формированию гранул в сферы. На поверхности перекатывающегося шарика возникает толчок и срезающее усилие. Часть неровностей гранулы не выдерживает этих напряжений и разрушается, а прочно прилипшие зерна вдавливаются внутрь.

Структура гранулы уплотняется постепенно под действием большого числа ударов различного направления, в результате чего взаимное перемещение частиц происходит только на тех участках, где в данный момент сила сцепления имеет наименьшее значение. Динамические нагрузки в грануляторе не должны превышать допустимые. Напряжения в комке не должны быть разрушающими.

Стадия стабилизации структуры гранул. Связи между частицами, уплотненными при окатывании, в большей мере обусловлены силами поверхностного натяжения жидкости. Эти связи обеспечивают достаточную пластичность материалу и позволяют в широких пределах модифицировать форму гранулы без ее разрушения. Для получения готового продукта необходимо упрочнить связи, придавая жесткость полученной структуре. Это достигается удалением жидкой фазы или переводом ее в твердую фазу.

Одним из наиболее распространенных способов упрочнения гранул является сушка. В процессе сушки образуются новые фазовые контакты, кристаллические спайки между отдельными частицами гранулы, приводящие к увеличению прочности. Конечное содержание влаги в продукте в значительной мере определяет физико-механические свойства, такие как гигроскопичность, слеживаемость, прочность и др. С увеличением содержания влаги физико-механические свойства значительно ухудшаются.

Влага, входящая в состав гранул, включает поверхностную влагу, удерживаемую в гранулах механическими силами сцепления, сорбционную влагу, удерживаемую вследствие адсорбции и абсорбции, и капиллярную влагу, заполняющую капилляры и поры гранул.

Процесс сушки протекает с определенной скоростью, которая зависит от формы связи влаги с материалом и механизма превращения в нем влаги, при этом длительность процесса сушки определяется следующими факторами:

- размерами частиц высушиваемого материала;
- параметрами теплоносителя (температура, влагосодержание, скорость);
- величиной начальной и конечной влажности материала, а также его температурой;
- структурой материала и формой связи влаги с ним.

В процессе удаления из гранулы жидкой фазы может происходить не только упрочнение структуры, но и ее разрушение [6].

Вывод. Сила капиллярного сцепления в объеме увлажненного сыпучего материала тем ниже, чем из более крупных зерен он состоит. Высокое среднеэффективное расстояние между частицами приводит к понижению прочности сцепления. При увеличении содержания мелких фракций структура материала становится более плотной, прочность гранул возрастает.

Предельный размер образующихся комков прямо пропорционален величине капли и обратно пропорционален пористости слоя материала. Чем выше влагосодержание порошка, тем быстрее насыщается поверхностный слой гранул и тем быстрее наступает переход от одного характера влагопоглощения к другому. Чем больше поверхностное натяжение жидкости и мельче частицы, тем плотнее агломерат. Введение требуемого количества жидкости приводит к увеличению влажности шихты и образованию крупных агломератов. С уменьшением содержания влаги физико-механические свойства агломератов улучшаются.

Список использованных источников

1. Прушак, В.Я. Разработка новых технических решений по увеличению выпуска гранулированного хлорида калия с применением валковых прессов, изготавливаемых в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» / В.Я. Прушак, Н.Ю. Кондратчик, Н.А. Высоцкая / Труды БГТУ. – 2020. – Сер. 2, № 1. – С. 62-67.
2. Высоцкая, Н.А. Особенности получения NPK-удобрений методом окатывания / Н.А. Высоцкая, В.С. Франкевич // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 4. – С. 79-85.
3. Леонов, Ф.Н. Эффективность минеральных удобрений в зависимости от обеспеченности подвижными фосфатами дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы / Ф.Н. Леонов, Т.Г. Синевич // Почвоведение и агрохимия. – 2017. – № 1 (58). – С. 109-116.

4. Кузьминых, К.Г. Формирование гранулометрического состава хлорида калия в результате температурноциклонной обработки пылевидных фракций / К.Г. Кузьминых, В.З. Пойлов // Химическая промышленность сегодня. – 2015. – № 5. – С. 7-15.

5. Кондратчик, Н.Ю. Методы гранулирования НРК-удобрений. Способы гранулирования методом прессования и окатывания / Н.Ю. Кондратчик, Н.А. Высоцкая, В.С. Францкевич // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 1. – С. 56-70.

6. Методы гранулирования удобрительных композиций / А.А. Болысбек [и др.] // Социально-экономические и гуманитарные науки. Образование. Культура. Общество. Технические и естественные науки: сб. статей по материалам научн. конф. ГНИИ, Санкт-Петербург, 26-28 июня 2019 г. / НОУ доп. проф. образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ». – Санкт-Петербург, 2019. – С. 178-180.

7. Прушак, В.Я. Разработка и внедрение новой технологической линии по производству сложносмешанных НРК-удобрений / В.Я. Прушак, И.М. Заяц, В.И. Новошнова // Proceedings: XII Национальная конф. с междунар. участием по открытой и подводной добыче полезных ископаемых, Варна, 26-30 июня 2013 г. / Научно-технический Союз по горному делу, геологии и металлургии. – Варна, 2013. – С. 359-362.

Информация об авторах

Высоцкая Надежда Александровна – аспирант УО «Белорусский государственный технологический университет», заместитель начальника отдела научно-технической информации, ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: ipr@sipr.by.

Францкевич Виталий Станиславович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических и силикатных производств», УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: fvs2@tut.by.

Information about the authors

Vysotskaya Nadezhda Aleksandrovna – Post-graduate Student, Belarusian State Technological University, Deputy Head of the Department of Scientific and Technical Information, JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: ipr@sipr.by.

Frantskevich Vitaliy Stanislavovich – Ph. D. (Engineering), Head of the Department of Machines and Apparatuses of Chemical and Silicate Production, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: fvs2@tut.by.

Поступила в редакцию 08.02.2021 г.