

УДК 66.0992.002.237

DOI: 10.18384/2310-7189-2016-2-144-152

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ГРАНУЛИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВМЕЩЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ

Макаренков Д.А.¹, Назаров В.И.²

¹Государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химических реактивов и особо чистых химических веществ (ФГУП «ИРЕА») 107076, г. Москва, ул. Богородский вал, 3, Российская Федерация

²Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ) 107023, Москва, ул. Большая Семёновская, 38, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены основные принципы гранулирования многокомпонентных полидисперсных материалов с использованием совмещения процессов механоактивации и пластификации, описываемых на основе реологических моделей. Приведены физические модели гранулирования методами прессования и окатывания. Данный подход позволяет в несколько раз увеличить удельную объемную производительность аппаратов, существенно снизить энергозатраты и повысить качество получаемых продуктов.

Ключевые слова: гранулирование, многокомпонентные полидисперсные шихты, реологические модели, очаг деформации. ¹

BASIC PRINCIPLES OF ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES FOR GRANULATION OF MULTICOMPONENT POLYDISPERSE MATERIALS WITH THE HELP OF COMBINED PREPARATION PROCESSES

D. Makarenkov¹, V. Nazarov²

¹Federal State Unitary Enterprise 'The State Scientific-Research Institute of Chemical Reagents and High-Purity Chemical Substances (IREA)' Bogorodskii val 3, 107076 Moscow, Russia;

²Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI) ul. Bol'shaya Semenovskaya 38, 107023 Moscow, Russia

Abstract. We consider the basic principles of granulation of multicomponent polydisperse materials with the use of combined processes of mechanical activation and plasticization, which are described on the basis of rheological models. Physical models of granulation by pressing and roll-on methods are presented. This approach allows one to increase several-fold the specific volume productivity of devices, to lower energy consumption, and to increase the quality of the received products.

Keywords: granulation, multicomponent polydisperse materials, rheological models, deformation zone.

В настоящее время энергосберегающие технологии получения гранулированных целевых продуктов нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Это достигается за счет выбора рациональных режимных параметров процесса и совершенствования аппаратного оформления. Однако этот путь не всегда обеспечивает получение гранулированного продукта заданного качества, что связано с тем, что в процесс гранулирования вовлекаются значительные количества отходов и техногенного сырья [5]. Эти материалы отличаются химической и физической неоднородностью, гранулометрическим и морфологическим составом.

Проанализируем процесс гранулирования таких продуктов, как органоминеральные удобрения, стекольные и эмалевые шихты, легкие и тяжелые наполнители строительной промышлен-

ности, твердотопливные композиции и комбикорма. Нами было установлено, что снижение энергозатрат обеспечивается за счет использования в совмещенных процессах измельчения и смешения дополнительной поверхностной обработки материала. Использование технологических добавок в процессах гранулирования также снижает энергозатраты [4; 7].

Процессы гранулирования осуществляются при компактировании на валках с гладкой поверхностью, прокаткой на роторных грануляторах с кольцевой или плоской матрицей и на тарельчатых и турболопастных грануляторах при скоростном окатывании [1; 2; 13]. Выбор рационального метода гранулирования (рис.1) проводится на основе системного анализа с учетом структурно-деформационных и реологических характеристик.

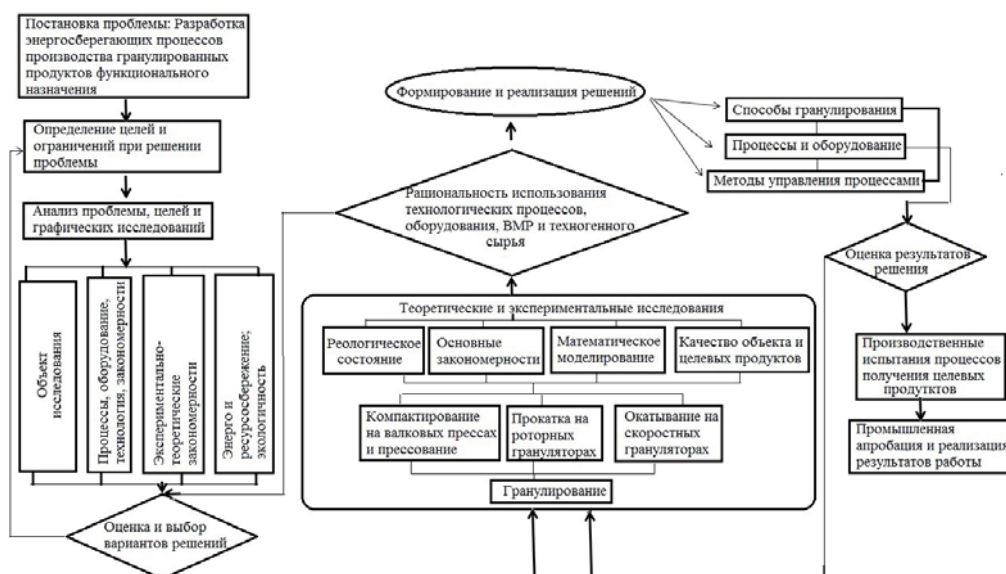


Рис.1 Алгоритм оценки и выбора метода гранулирования и аппаратного оформления при переработке многокомпонентных полидисперсных материалов (МПМ).

Указанный алгоритм выбора оптимальной технологии гранулирования учитывает изменения реологических параметров, физико-механических характеристик и кинетику гранулообразования. При её оценке используются физические модели уплотнения материалов при компактировании, прокатке и окатывании. При расчете процесса компактирования на валковом прессе используются основные положения механики дисперсных сред [1; 10]. Уплотнение материала осуществляется в очаге деформации, ограниченном цилиндрическими поверхностями валков и загрузочного бункера. При движении материала на него действуют силы тяжести, трения, адгезии и когезии и внешнее давление от объема шихты в бункере. Также необходимо учитывать капиллярные, молекулярные силы и межфазное поверхностное натяжение связующей жидкости [2; 14].

Использование дополнительной подготовки на стадии смешения приводит к перераспределению влаги по объему, и среда переходит из коагуляционной в коагуляционно-кристаллизационную [3]. Соответственно, меняются такие характеристики среды, как сыпучесть Q (кг/м²сек) и пластическая прочность P_m (МПа) [5]. При прохождении элемента шихты через очаг деформации под действием внешних нагрузок валкового пресса в нем возникают упруго-пластические деформации. При этом напряженно-деформационное состояние описывается на основе теории предельного равновесия. Расчет распределения контактных напряжений на поверхности валка сводится к определению поля напряжений в слоях порошка в очаге деформации.

При рассмотрении элементарного объема материала в очаге деформации нами была получена зависимость распределения контактных напряжений в зоне уплотнения с учетом дополнительной подготовки шихты [6]:

$$\sigma_n(\alpha) = \Delta \cdot \exp \left[T \left[\left(\frac{1}{\alpha} + \alpha \right) - \left(\frac{1}{\alpha_i} + \alpha_i \right) \right] \right], \quad (1)$$

где

$$\Delta = [3\sigma_c(1 + \sin\varphi) + C\sin\varphi] \cos\alpha_n, \quad (2)$$

$$T = f \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (3)$$

σ_c – среднее нормальное максимальное напряжение определяется экспериментально при прессовании в закрытой матрице; для МПМ оно является функцией сыпучести (Q) и пластической прочности (P_m); f – коэффициент внешнего трения материала по поверхности валка; φ – угол внутреннего трения; α_n , α_n – текущий и нейтральный углы прокатки, соответственно. В результате уменьшается величина среднего нормального напряжения, что снижает энергозатраты при компактировании.

Получение гранул при прокатке на роторном грануляторе происходит при взаимодействии ролика, катящегося по поверхности перфорированной матрицы с каналами переменного сечения со слоем материала и основывается на пластической деформации гранулируемой среды. Впервые предложено рассматривать процесс образования гранул в роторном грануляторе как совокупность последовательно сменяющихся фаз уплотнения шихты: захват и предварительное уплотнение массы материала между роликом и матрицей, деформирование при движении массы по кана-

лам переменного сечения матрицы без разрыва сплошности с образованием твердого пористого тела на выходе.

При этом установлено нами, что плотносточные прессовки без разрыва сплошности материала в грануле получаются только в случае постоянного силового воздействия прокатывающих роликов на материал, проходящий через каналы матрицы. Снижение энергозатрат обеспечивается за счет определенного режима движения материала, характеристик шихты (влажность (W), грансостав ($d_{0,5}$) и плотность (ρ)), геометрии канала, соотношения живых сечений на внешней поверхности матрицы и на поверхности выхода гранул из каналов [7].

Энергосбережение МПМ с использованием техногенного сырья с вторичными материальными ресурсами (ВМР) методами окатывания обеспечивается за счет использования скоростных динамических режимов работы гранулирующего оборудования¹. Использование повышенных скоростей движения вала с лопатками в горизонтальном аппарате и скорости вращения чаши тарельчатого гранулятора приводит к интенсивным соударениям между частицами и перераспределению влаги. Гранулообразование в таком случае происходит при взаимодействии между собой совокупности «пакетов» частиц, движущихся по спиральной траектории. Подбор оптимальных траекторий дви-

жения пакетов частиц осуществлялся с использованием лицензионной программы расчёта роторных смесителей формовочных материалов «Rotor v.2»².

Нами было установлено, что увеличение частоты вращения ротора от 300 об/мин до 1300 об/мин приводит к изменению траектории и направлению выброса частиц, а их сход с лопасти происходит веерообразно. Установлено, что при углах наклона лопатки $\alpha=5^{\circ}, 20^{\circ}$ смесь движется по направлению оси y , при этом время движения пакета частиц до встречи со следующей лопаткой увеличивается. При углах наклона лопатки $\alpha=40^{\circ}, 45^{\circ}$ время схода смеси с лопатки уменьшается. Таким образом, можно регулировать время пребывания материала в грануляторе, кинетику гранулообразования и гранулометрический состав целевого продукта [5]. В рассмотренных процессах гранулирования МПМ с использованием ВМР также применяется дополнительная механическая подготовка и пластификация (за счет ввода связующих и термонагрева) [3; 11].

Выбор энергосберегающей технологии определяется оптимальными физико-механическими и реологическими характеристиками МПМ [1; 8]. Так, при прессовании методами компактирования и прокатки изменение плотности определяется по компрессионным кривым, а структурообразование при прохождении материала через очаг деформации описывается в виде четырех последовательных стадий (рис. 2) с помощью реологических моделей [4].

² Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ «Программа расчета роторных рабочих органов смесителей формовочных материалов (ROTORv.2)» (М.Ю. Ершов и Д.В. Филонов): Роспатент, 16.08. 2000 г., № 200061749.

¹ См. Способ гранулирования дисперсных материалов (Д.А. Макаренко, В.И. Назаров, Р.А. Санду): Патент РФ 2515293, МПК В01J2/14, подача заявки 27.12.2012 г., публикация 10.05.2014 г., патентообладатель – Государственный Орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химических реактивов и особо чистых химических веществ (ФГУП).

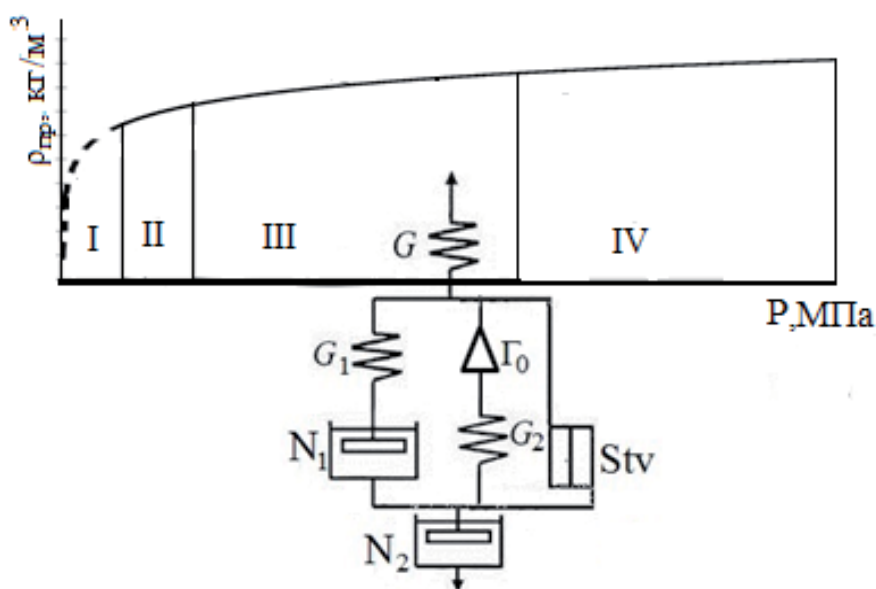


Рис. 2. Структурно-реологическая модель формирования гранул при объемном деформировании в процессе компактирования: (I-IV) – стадии уплотнения

На первой стадии в бункере валкового пресса происходит деаэрация порошков и изменение плотности от насыпной ρ_n к плотности после утряски $\rho_{утр}$. В этой зоне за счёт микровибраций вращающихся валков, действующих на увлажненную шихту, упругий элемент с модулем G характеризует капиллярную жидкость. Упругий элемент мгновенно воздействует на вязкий «амортизатор Ньютона» с постоянной вязкостью. Жидкость, являясь демпфером, перераспределяется в межпоровом пространстве и обеспечивает плотность $\rho_{утр}$.

На второй стадии до момента получения прессовок с минимальной прочностью происходит образование прочно-плотной структуры, и среда ведет себя как сыпуче-пластичная, описываемая моделью Бюргера. На третьей стадии плотность и прочность прессовок растет до постоянной величины

в определенном диапазоне удельных давлений. При этом материал становится условно-пластичным, а его поведение описывается моделью Шведова. Разрушение внутренней структуры смеси сопровождается одновременным возрастанием сопротивления объемной деформации, то есть упрочнением структуры. На четвертой стадии плотность прессовок остается практически постоянной, а прочность увеличивается в процессе хранения за счет протекания твердофазных реакций. Например, при гранулировании минеральных веществ, среда становится упруго-пластичной, а на основе растительных отходов – упруго-твердеющей. Состояние таких сред после снятия нагрузок и во время хранения описывается моделью Максвелла-Томпсона [4; 6; 7].

Обобщенная структурно-реологическая модель при объемном деформировании МПМ имеет вид [6]:

$$\text{МПМ}_0 = G - (G_1/\Gamma_0 - N_1/G_2)/\text{Stv} - N_2, \quad (5)$$

где G_1, G_2 – упругие элементы Гука, зависящие от сопротивления внутреннему трению и вязкости связующего; N_1, N_2 – вязкий элемент Ньютона; Γ_0 – стопор, характеризующий одностороннее деформирование; Stv – пластичный элемент Сен-Венана, характеризующий перемещение частиц МПМ.

Система уравнений относительно деформаций и напряжений при компактировании упруговязкого материала имеет вид [9]:

$$\varepsilon \approx \frac{\sigma}{3K_1} + \frac{\sigma}{3K_2} \left[1 - e^{-\frac{K_2}{\eta n} t} \right], \quad (6),$$

$$\sigma = 3\varepsilon \left[K_1 + K_2 \left(1 - e^{-\frac{K_1 + K_2}{\eta n} t} \right) \right], \quad (7),$$

где: K_1, K_2 – модули упругости неуплотненной смеси зависящий от внутреннего трения и связующего, соответственно; η_n – коэффициент объемной вязкости смеси.

На всех стадиях прессования изменяется структурная прочность гранулируемой системы.

При окатывании материалов с содержанием влаги более 20% (например, органоминеральных удобрений) происходят пространственные перемещения частиц, что определяется количеством связанной или капиллярной жидкости. Процесс гранулообразования при скоростном окатывании происходит в три стадии: формирование и рост зародышей гранул из первичных агрегатов; рост и упрочнение гранул (без перестройки структуры); уплотнение гранул с перестройкой структуры. В зависимости от влажности шихты процесс структурообразо-

вания описывается комбинацией реологических моделей (рис. 3) [4; 7].

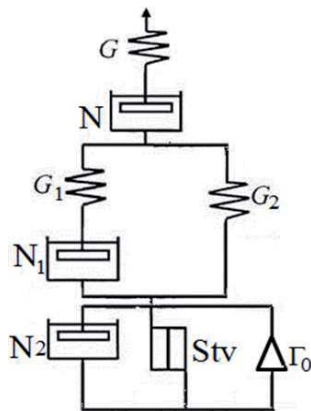


Рис. 3 Структурно-реологическая модель окатывания (на примере гранулирования органоминеральных удобрений)

Структурный вид реологической модели записывается в виде $\text{МПМ}_{\text{ок}} = G - N - ((G_1 - N_1)/G_2) - (N_2/\text{Stv}/\Gamma_0)$, (4) где G, G_1, G_2 – упругие элементы Гука, зависящие от сопротивления внутреннему трению и вязкости связующего; N_1, N_2 – вязкий элемент (амортизатор) Ньютона; Γ_0 – стопор, характеризующий одностороннее деформирование; Stv – элемент Сен-Венана, характеризующий перемещение частиц.

Таким образом, проведенный анализ трех методов гранулирования на основе реологических моделей позволяет в определенном диапазоне влажности МПМ выбирать рациональную технологию гранулирования методами компактирования, прокатки и скоростного окатывания. Такой выбор обеспечивается совмещенными процессами подготовки шихты, включающие измельчение, смешение, поверхностную обработку и ввод дополнительных связующих.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генералов М.Б. Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии: учебное пособие. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. 592 с.
2. Классен П.В., Гришаев И.Г., Шомин И.П. Гранулирование. М.: Химия, 1991. 240 с.
3. Макаренков Д.А. Классификация дисперсных сред на основе вторичных материальных ресурсов по реологическим свойствам // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2012. № 3. С. 66–73.
4. Макаренков Д.А., Назаров В.И. Вопросы применения прикладной реологии в процессах гранулирования многокомпонентных полидисперсных шихт // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2013. № 3 (72). С. 185–191.
5. Макаренков Д.А., Назаров В.И. Особенности процесса гранулирования комплексных и органоминеральных удобрений в скоростных и тарельчатых грануляторах окатывания // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2012. № 4. С. 81–88.
6. Макаренков Д.А., Назаров В.И. Разработка процессов гранулирования целевых продуктов с использованием техногенного сырья методами прессования и окатывания // Пути решения экологических проблем газовых выбросов и сточных вод в производстве минеральных удобрений: материалы международной научно-практической конференции (г. Москва, 21 мая 2013 г.). М.: Научно-исследовательский институт по удобрениям и инсектофунгицидам им. проф. А.Я. Самойлова, 2013. С. 13–18.
7. Макаренков Д.А., Назаров В.И., Мавлюдова Я.А. Особенности процесса граулирования топливных композиций методом прокатки на роторных грануляторах // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2015. № 1. С. 42–49.
8. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепция, методы, приложения. СПб.: Профессия, 2007. 506 с.
9. Матвеев И.В., Исагулов А.З. Формование и стержневое оборудование литейных цехов. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2004. 215 с.
10. Перельман В.Е. Формование порошковых материалов. М.: Металлургия, 1979. 232 с.
11. Промтов М.А. Синергетический подход к энергосберегающим процессам // Успехи современного естествознания. 2004. № 4. С. 163–164.
12. Систер В.Г., Мартынов Ю.В. Принципы повышения эффективности тепломассообменных процессов. Калуга: Изд-во Н.Бочкаревой, 1998. 508 с.
13. Таран А. Л. Теория и практика процессов гранулирования расплавов и порошков: дис... докт. техн. наук. М., 2001. 524 с.
14. Теория управления окомкованием сыпучих материалов / Е.А. Исаев и др. Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2004. 384 с.

REFERENCES

1. Generalov M.B. Mekhanika tverdykh dispersnykh sred v protsessakh khimicheskoi tekhnologii: uchebnoe posobie [Mechanics of solid dispersed environments in the processes of chemical technology: textbook]. Kaluga, Izdatel'stvo N. Bochkarevoi, 2002. 592 p.
2. Klassen P.V., Grishaev I.G., Shomin I.P. Granulirovanie [Granulation]. M., Khimiya, 1991. 240 p.
3. Makarenkov D.A. Klassifikatsiya dispersnykh sred na osnove vtorichnykh material'nykh resursov po reologicheskim svoistvam [Classification of disperse media on the basis of secondary material resources in their rheological properties] // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki. 2012. no. 3. Pp. 66–73.

4. Makarenkov D.A., Nazarov V.I. Voprosy primeneniya prikladnoi reologii v protsessakh granulirovaniya mnogokomponentnykh polidispersnykh shikht [The application of applied rheology in the processes of granulating polydisperse multicomponent mixes] // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2013. no. 3 (72). Pp. 185–191.
5. Makarenkov D.A., Nazarov V.I. Osobennosti protsessa granulirovaniya kompleksnykh i organomineral'nykh udobrenii v skorostnykh i tarel'chatykh granulyatorakh okatyvaniya [Features of pelletizing process and complex organic-mineral fertilizers in fast and disc pelletizing granulators] // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki. 2012. no. 4. pp. 81–88.
6. Makarenkov D.A., Nazarov V.I. Razrabotka protsessov granulirovaniya tselevykh produktov s ispol'zovaniem tekhnogennoho syr'ya metodami pressovaniya i okatyvaniya [Development of processes of granulation of target products with the use of technogenic raw materials by methods of extrusion and pelletizing] Puti resheniya ekologicheskikh problem gazovykh vybrosov i stochnykh vod v proizvodstve mineral'nykh udobrenii: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsiya (g. Moskva, 21 maya 2013 g.) [Solutions to environmental issues of gas emissions and wastewater in the production of mineral fertilizers: materials of the international scientific-practical conference (Moscow, May 21, 2013)]. M., Nauchno-issledovatel'skii institut po udobreniyam i insektofungitsidam im. prof. A.Ya. Samoilova, 2013. Pp. 13–18.
7. Makarenkov D.A., Nazarov V.I., Mavlyudova Ya.A. Osobennosti protsessa granulirovaniya toplivnykh kompozitsii metodom prokatki na rotornykh granulyatorakh [Features of the process of granulation of fuel compositions by rolling on a rotary granulators] // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki. 2015. no. 1. Pp. 42–49.
8. Malkin A.Ya., Isaev A.I. Reologiya: kontseptsiya, metody, prilozheniya [Rheology: concepts, methods, applications]. SPb., Professiya, 2007. 506 p.
9. Matveenko I.V., Isagulov A.Z. Formovanie i sterzhnevoe oborudovanie liteinykh tsekhov [Molding and core equipment foundries]. Karaganda, Izd-vo KarGTU, 2004. 215 p.
10. Perel'man V.E. Formovanie poroshkovykh materialov [Molding powder materials]. M., Metallurgiya, 1979. 232 p.
11. Promtov M.A. Sinergeticheskii podkhod k energosberegayushchim protsessam [A synergistic approach to energy-efficient processes] // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2004. no. 4. Pp. 163–164.
12. Sister V.G., Martynov Yu.V. Printsipy povysheniya effektivnosti teplomassoobmennyykh protsessov [The principles of increasing the efficiency of heat and mass transfer processes]. Kaluga, Izd-vo N.Bochkarevoi, 1998. 508 p.
13. Taran A.L. Teoriya i praktika protsessov granulirovaniya rasplavov i poroshkov: dis... dokt. tekhn. nauk [Theory and practice of processes of granulation of melts and powders: dis... doctor tech. sciences]. M., 2001. 524 p.
14. Teoriya upravleniya okomkovaniem sypuchikh materialov / E.A. Isaev i dr. [Management theory for pelletizing loose materials / E.A. Isaev et al.]. Staryi Oskol, OOO «TNT», 2004. 384 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Макаренков Дмитрий Анатольевич – заведующий лабораторией Государственного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института химических реактивов и особо чистых химических веществ (ФГУП «ИРЕА»);
e-mail: makarenkovd@gmail.com

Назаров Вячеслав Иванович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной экологии и альтернативной энергетики Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ);
e-mail: nazarov_vi41@mail

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Makarenkov Dmitrii Anatol'evich – candidate of technical sciences, associate professor, head of the Laboratory of the Federal State Unitary Enterprise ‘The State Scientific-Research Institute of Chemical Reagents and High-Purity Chemical Substances (FSUE IREA);
e-mail: makarenkovd@gmail.com;

Nazarov Vyacheslav Ivanovich – candidate of technical sciences, associate professor, assistant professor of the Chair of Engineering Ecology and Alternative Energy Sources at the Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI);
e-mail: nazarov_vi41@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаренков Д.А., Назаров В.И. Основные принципы энергосберегающих технологий гранулирования многокомпонентных полидисперсных материалов с использованием совмещенных процессов подготовки // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2016. № 2. С. 144-152.
DOI: 10.18384/2310-7189-2016-2-144-152

BIBLIOGRAPHIC REFERENCE

D. Makarenkov, V. Nazarov. Basic principles of energy-saving technologies for granulation of multicomponent polydisperse materials with the help of combined preparation processes // / Bulletin of Moscow State Regional University. Series: Natural sciences. 2016. no 2. pp. 144-152.
DOI: 10.18384/2310-7189-2016-2-144-152