

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГРАНУЛИРОВАНИЯ ИЗ РАСПЛАВОВ ПУТЕМ ПОРЦИОННОГО КОНТАКТНОГО НАКАПЫВАНИЯ НА ОХЛАЖДАЕМУЮ НАРУЖНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ БАРАБАНА

Г.В. Леонов, Р.Г. Леонов

На основе осуществления экспериментального и компьютерного моделирования гидромеханических и тепловых процессов изучено формирование и затвердевание гранул, получаемых из расплава путем контактного накапывания на боковую охлаждаемую поверхность барабана. Результаты моделирования позволяют рекомендовать переход на данную технологию производств, содержащих технологическую фазу гранулирования расплава при непосредственном контакте с жидким хладагентом, ввиду высокой энергоемкости последней в связи с необходимостью тепловой сушки получаемых гранул.

Ключевые слова: порционное контактное накапывание, гранулирование из расплавов, компьютерное моделирование, затвердевание материала гранулы.

ВВЕДЕНИЕ

В химической и смежных областях промышленности распространены процессы получения форм конечного или промежуточного продукта путем гранулирования из расплавов при непосредственном контакте с хладагентом. Таким образом получают гранулы химических удобрений, пищевых веществ, промышленных взрывчатых материалов и др. В случае использования хладагента в газовой фазе приходится создавать грануляционные башни циклопических размеров [1,2,3]. Применение значительно более компактных колонн гранулирования расплава при непосредственном контакте с жидким хладагентом, когда таковой возможен, как правило, вынуждает включать в состав технологической цепочки фазу тепловой сушки полученных гранул. Такого рода процессы весьма энергоемки, что обуславливает существенное удорожание готовой продукции. Кроме того, применение жидкого хладагента предполагает наличие системы замкнутого водооборота, что также требует весьма существенных капитальных и текущих затрат.

СПОСОБ И ОБОРУДОВАНИЕ

Существует возможность получения вполне качественных монодисперсных гранул без организации непосредственного контакта расплава с хладагентом. Еще в конце восьмидесятых годов нами было получено авторское свидетельство СССР [4] на способ сухого гранулирования порционным контактным накапыванием и устройство для его осуществ-

вления. Суть гранулирования путем порционного контактного накапывания расплава на охлаждаемую поверхность барабана состоит в том, что растущая капля расплава должна коснуться охлаждаемой поверхности до момента отрыва капли от отверстия диспергатора]. Особенности процесса гранулообразования в этом случае заключаются в следующем. Капля начинает формироваться на срезе капилляра, движущегося в направлении вращения барабана со скоростью, равной линейной скорости его поверхности (рисунок 1а,б).

После касания капель охлаждаемой поверхности образуется на небольшой площади кристаллическая подложка (рисунок 1в). При дальнейшем росте капли капилляр удаляется от охлаждаемой поверхности (рисунок 1г). Угол между касательными к поверхностям капли и барабана на границе кристаллической подложки $\Theta < 90^\circ$. После отрыва капилляра от капли (рисунок 1д) формирование гранулы закончено. Капилляр возвращается в исходную позицию и цикл повторяется (рисунок 1е).

Устройство для реализации описанного способа формирования гранул из расплава изображено в виде конструктивной схемы на рисунок 2.

Устройство включает в себя цилиндрический барабан 1 с охлаждаемой боковой поверхностью, обогреваемый цилиндрический барабан 2 узла формирования капель, заслонку 3, закрепленную неподвижно относительно барабана 2, штуцер 4 для подачи расплава во внутреннюю полость узла формирования, насадки истечения 5 капель расплава,

равномерно расположенные по боковой поверхности барабана 2, распорную пружину 6.

Устройство работает следующим образом. Благодаря фрикционной передаче момента вращения от барабана 1 к барабану 2 они вращаются навстречу друг другу. Этим обеспечивается равенство линейных скоростей боковой поверхности барабана 1 и узлов дозирования капель расплава, расположенных по окружности с радиусом R_2 .

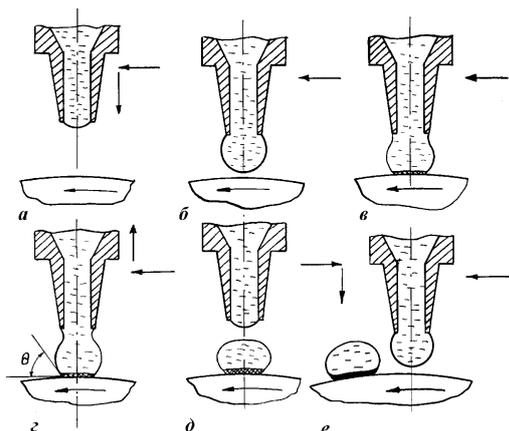


Рисунок 1. Схема формирования гранулы способом порционного контактного накопления на охлаждаемую поверхность барабана.

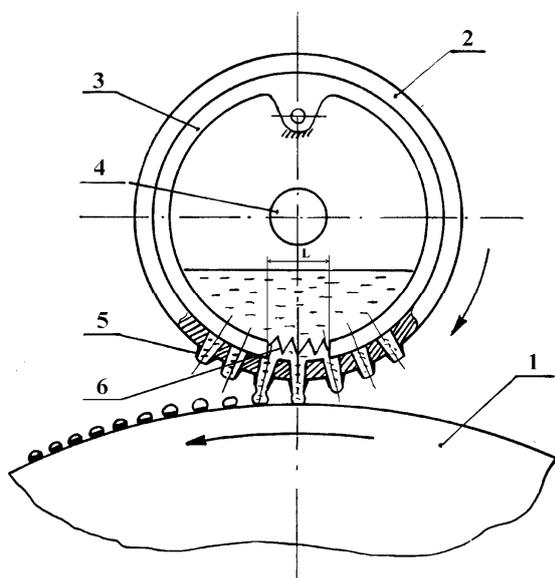


Рисунок 2. Схема устройства для реализации способа гранулирования путем порционного контактного накопления: 1 - барабан с охлаждаемой поверхностью; 2 - барабан - диспергатор; 3 - цилиндрическая заслонка диспергатора; 4 - штуцер подачи расплава; 5 - насадки истечения; 6 - пружина распорная.

Расплав непрерывно подают в узел формирования капель через штуцер 4 и поддерживают на определенном уровне. Наса-

док истечения 5, двигаясь относительно неподвижной заслонки 3, попадает в зону действия статического напора расплава и на его срезе формируется капля расплава. Затем она касается охлаждаемой поверхности барабана 1. Как только узел дозирования выходит из зоны действия статического напора расплава, происходит отрыв капли расплава от узла дозирования и далее идет процесс кристаллизации вещества гранулы на боковой поверхности барабана 1. Заслонка 3 предотвращает разбрызгивание расплава вне зоны формирования капель.

На рисунке 3 представлена фотография опытной лабораторной установки установка для натурного исследования описываемого процесса.

Фотография полученных гранул приведена на рисунке 4. В экспериментах были получены гранулы массой до 40 мг, отличающиеся высокой прочностью.

В настоящее время похожие способ и устройство производит и использует шведская фирма Sandvik Process Systems). Охлаждаемой поверхностью в устройствах указанной фирмы является поверхность стальной ленты транспортера.

С целью получения базы для расчета такого рода установок была создана компьютерная модель процесса гранулирования путем контактного накопления на наружную охлаждаемую поверхность цилиндрического барабана.

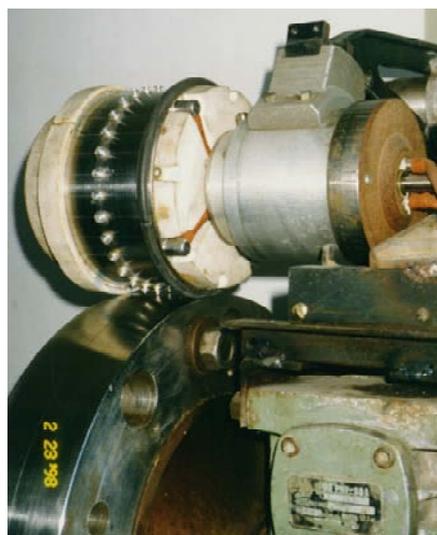


Рисунок 3. Опытная установка для получения гранул путем порционного контактного накопления расплава на охлаждаемую наружную поверхность барабана.

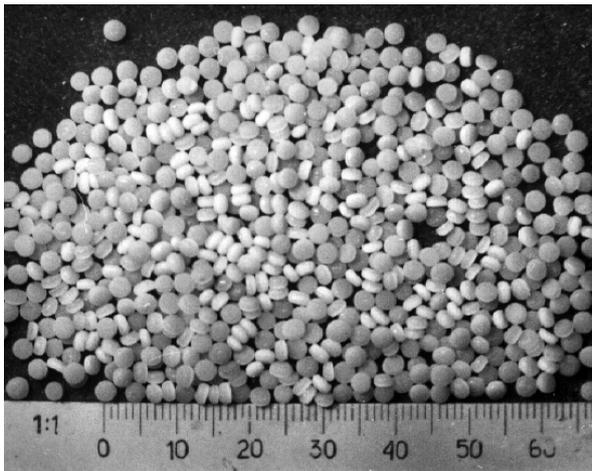


Рисунок 4. Фотография гранул, полученных путем порционного контактного накопления.

ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КАПЛИ РАСПЛАВА

Объем гранулы, формируемой по методу порционного контактного накопления, может быть найден на базе описания истечения расплава из отверстия под действием гидростатического давления и центробежных сил с учетом геометрических и механических характеристик устройства диспергирования. На рисунке 5 представлена конструктивная схема барабана - диспергатора с обозначениями определяющих истечение параметров, а на рисунке 6 - схема к расчету производительности с указанием параметров фрикционного привода. Производительность гранулятора:

$$M_{\sigma} = \frac{(3\pi D_{\text{ок}} / (4S) + 1) \times V_{\kappa} \rho_p}{\tau_{\text{сп}}}, \quad (1)$$

где V_{κ} , $\tau_{\text{сп}}$ - объем капли и время ее затвердевания. Запишем уравнение сохранения энергии для потока расплава, вытекающего из отверстия. Ввиду незначительных изменений положения выходного среза сопла при прохождении зоны истечения запись будем вести для нижней точки траектории его движения:

$$\rho g H + p_u = \frac{\rho w^2}{2} + \xi_1 \frac{\rho w^2}{2} + \lambda \frac{H_1 + \delta}{d_o} \cdot \frac{\rho w^2}{2} + \xi_2 \frac{\rho w^2}{2}, \quad (2)$$

где ρ - плотность расплава; w - скорость истечения расплава из отверстия; d_o - диаметр отверстия истечения; ξ_1, ξ_2 - коэффици-

енты местных сопротивлений соответственно на входе и выходе из отверстия насадка истечения; λ - коэффициент внутреннего трения в движущейся жидкой фазе; p_u - давление, обусловленное действием центробежной силы; H_1 - высота насадка над поверхностью барабана; H - высота расплава над нижней точкой траектории движения среза истечения; δ - толщина стенки барабана - диспергатора.

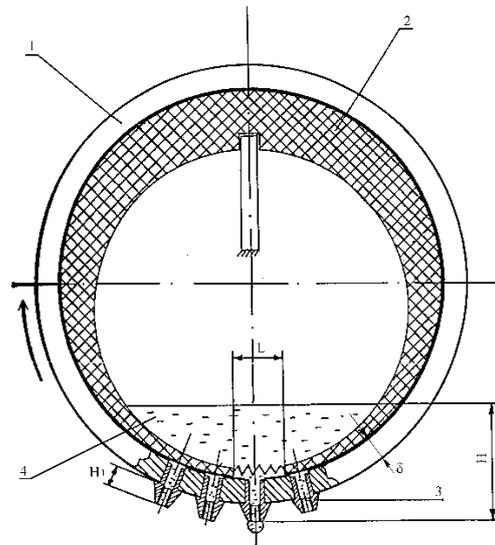


Рисунок 5. Конструктивная схема барабана - диспергатора: 1 - цилиндрический корпус барабана - диспергатора с аксиальными (расположенными вдоль образующих) рядами отверстий для насадков истечения; 2 - цилиндрическая заслонка с вырезом в зоне истечения расплава; 3 - насадок истечения; 4 - расплав.

Давление, обусловленное действием центробежной силы, определим из следующих соображений.

Элементарное приращение давления dp_u на элементарном приращении длины dr отверстия истечения:

$$dp_u = \frac{dP}{F_o},$$

где dP - элементарное приращение центробежной силы; F_o - площадь сечения отверстия истечения.

$$dP = \rho F_o \omega_o^2 r dr,$$

где ω_o - угловая частота вращения барабана - диспергатора.

С учетом последнего равенства

$$dp_u = \rho \omega_o^2 r dr.$$

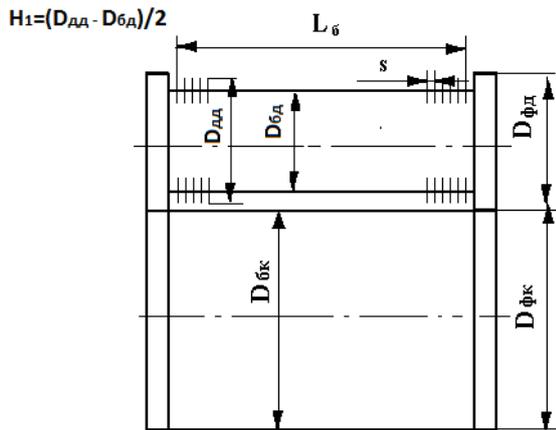


Рисунок 6. Схема к расчету производительности гранулятора.

Полное давление в выходном сечении насадка истечения определится:

$$p_u = \rho \omega_o^2 \int_{R_1}^{R_2} r dr = \frac{1}{2} \rho \omega_o^2 (R_2^2 - R_1^2),$$

где R_1, R_2 - соответственно радиус контакта заслонки и внутренней поверхности барабана диспергатора и радиус окружности, описываемой срезом выходного отверстия насадка истечения.

$$R_2 = R_1 + H_1 + \delta.$$

После подстановок и преобразований окончательно получим:

$$w = \varphi \sqrt{2gH + \omega_o^2 (R_2^2 - R_1^2)}, \quad (3)$$

где φ - коэффициент скорости истечения.

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi_1 + \xi_2 + \lambda \frac{H_1 + \delta}{d_o}}}.$$

Объем капли расплава, сформировавшейся за период времени доступа расплава к отверстию истечения $\Delta \tau$, определится:

$$V_b = w \varepsilon \frac{\pi d_o^2}{4} \Delta \tau, \quad (4)$$

где ε - коэффициент сжатия струи.

$$\text{Время истечения } \Delta \tau = L / \omega_o R_1.$$

Эквивалентный объемный диаметр капли расплава:

$$d_b = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}. \quad (5)$$

Величины диаметров фрикционных дисков соответственно диспергатора и кристаллизатора:

$$D_{\phi\delta} = D_1 + 2(H_1 + \delta), \quad (6)$$

$$D_{\phi\kappa} = D_{\phi\kappa} + 2(H_1 + k_n h_{zp}), \quad (7)$$

где h_{zp} - высота гранулы; k_n - коэффициент, определяемый в процессе настройки привода.

Угловая частота вращения диспергатора

$$\omega_o = \omega_{кр} \frac{D_{\phi\delta}}{D_{\phi\kappa}}.$$

Величину шага между центрами отверстий насадок истечения вдоль образующей и по окружности цилиндра - диспергатора примем $S = 1,25d_{cp}$ (в экспериментальном варианте диспергатора эта величина составляла $3d_{cp}$).

Заданным параметром является эквивалентный объемный диаметр гранулы d_k . В качестве расчетных параметров диспергатора целесообразно рассматривать ширину выреза заслонки L , величину высоты уровня расплава H и диаметр отверстия истечения d_o . Величина $\omega_{кр}$ может быть определена на базе компьютерного моделирования теплопереноса в процессе охлаждения и кристаллизации вещества гранулы, находящейся на поверхности барабана - кристаллизатора.

Моделирование теплопереноса в процессе охлаждения и кристаллизации вещества гранулы на охлаждаемой поверхности.

При описании теплопереноса в процессе охлаждения и кристаллизации вещества гранулы на охлаждаемой поверхности первым в числе решаемых возникает вопрос об аппроксимации формы получаемых гранул. Как видно из рис. 2.38, форма гранул близка к форме цилиндра (диска), высота которого примерно в два раза меньше диаметра, поверхность одного из оснований отличается заметной кривизной. Сопряжение поверхностей оснований и боковой поверхности реализуется поверхностью, вызывающей ассоциации с кольцевым фрагментом поверхности тора.

Ниже приводится математическое описание теплопереноса в рамках принятой модельной формы ограниченного цилиндра.

Базовая схема для описания теплопереноса в рамках данной модельной формы представлена на рисунке 2.41. Математическое описание в этом варианте аналогично приведенному в главе 1 для элементов трех-

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ГРАНУЛИРОВАНИЯ ИЗ РАСПЛАВОВ

фазного псевдооживленного слоя. Ограниченный цилиндр представляется фигурой, полученной в результате пересечения бесконечного цилиндра и неограниченной пластины. Основное уравнение:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial l^2} + \frac{2}{l} \frac{\partial T}{\partial l} \right), \quad (8)$$

Для бесконечного цилиндра $\Gamma = 1$, $l \equiv r$, $0 \leq r \leq R$

Для полубесконечной пластины $\Gamma = 0$, $l \equiv l$, $0 \leq l \leq h_{ep}$

где T - температура гранулы, $T = T(\tau, r, z)$; τ - текущее время процесса; R , h_{ep} - радиус и высота гранулы.

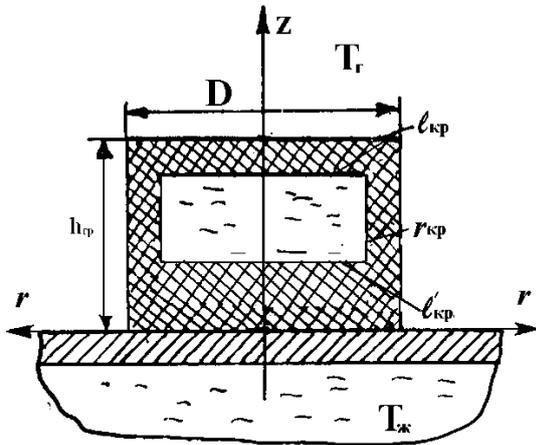


Рисунок 7. Базовая схема для описания теплопереноса в рамках модельной формы ограниченного цилиндра.

Граничные условия

$$-\frac{\partial T}{\partial r} \cdot \lambda_p = \alpha_c \cdot (T - T_c) \quad \text{при } r = R, \quad (2.107)$$

$$-\frac{\partial T}{\partial z} \cdot \lambda_p = \alpha_c \cdot (T - T_c) \quad \text{при } z = h_{ep}, \quad (2.108)$$

$$-\frac{\partial T}{\partial z} \cdot \lambda_p = K \cdot (T - T_{ж}) \quad \text{при } z = 0, \quad (2.109)$$

где α_c - коэффициент теплоотдачи на границе газ - гранула; K - коэффициент теплопередачи через стенку барабана; λ_p - коэффициент теплопроводности расплава.

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = 0, \quad (9)$$

$$T = T_0 \quad \text{при } \tau = 0$$

При достижении $\langle T \rangle = T_{кр}$

$$\frac{\partial T_{m\Box}}{\partial \tau} = a_m \left(\frac{\partial^2 T_{m\Box}}{\partial l^2} + \frac{2}{l} \frac{\partial T_{m\Box}}{\partial l} \right), \quad (10)$$

где подстрочный индекс m символизирует принадлежность параметра твердой фазе.

Для бесконечного цилиндра $\Gamma = 1$, $l \equiv r$, $r_{ep} \leq r \leq R$

Для полубесконечной пластины $\Gamma = 0$, $l \equiv l$, $0 \leq l \leq l'_{кр}$, $l_{кр} \leq l \leq h_{ep}$.

$$-\frac{\partial T_{\Box}}{\partial r} \cdot \lambda_{кр} = \alpha_c \cdot (T_{\Box} - T_c) \quad \text{при } r = R, \quad (11)$$

$$-\frac{\partial T_{\Box}}{\partial z} \cdot \lambda_{кр} = \alpha_c \cdot (T_{\Box} - T_c) \quad \text{при } z = l, \quad (12)$$

$$-\frac{\partial T_m}{\partial z} \cdot \lambda_{кр} = K \cdot (T_m - T_{ж}) \quad \text{при } z = 0, \quad (13)$$

Граничные условия Стефана:

$$\frac{\partial l'_{кр}}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{кр}}{\rho_{кр} \cdot \Delta H_{кр}} \cdot \frac{\partial T_{\Box}}{\partial z} \quad \text{при } z = l'_{кр}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial l_{кр}}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{кр}}{\rho_{кр} \cdot \Delta H_{кр}} \cdot \frac{\partial T_{\Box}}{\partial z} \quad \text{при } z = l_{кр}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial r_{кр}}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{кр}}{\rho_{кр} \cdot \Delta H_{кр}} \cdot \frac{\partial T_{\Box}}{\partial r} \quad \text{при } r = r_{кр}, \quad (16)$$

где $\lambda_{кр}$, $\rho_{кр}$ - коэффициент теплопроводности и плотность твердой кристаллической фазы.

Приведенное математическое описание (8-16) процесса теплопереноса при охлаждении и кристаллизации вещества капли расплава на охлаждаемой боковой поверхности цилиндра вкупе с механико-гидродинамическим, изложенным выше, положено в основу компьютерной модели гранулирования путем порционного контактного накопления. В рамках программы реализации модели при заданных геометрических характеристиках агрегата гранулирования определяется время, необходимое для затвердевания гранулы, адекватная частота вращения барабана - кристаллизатора и производительность.

Нами были промоделированы параметры промышленной установки для гранулирования промышленных взрывчатых веществ с использованием в качестве барабана - кристаллизатора барабан с геометрическими параметрами, обозначенными на рисунке 7, следующих значений: $D_{бк} = 1,4$ м; $L_б = 1,7$ м. В качестве базового варианта величина внутреннего диаметра барабана - диспергатора

была принята $D_1 = 2R_1 = 110$ мм (размер диспергатора испытанного опытного образца). Результаты компьютерного моделирования для ряда значений эквивалентных диаметров гранул представлены на рисунке 8. Величина рабочей поверхности охлаждаемого барабана принята равной 0,75 от величины боковой поверхности. Как видно, производительность гранулятора растет с уменьшением диаметра гранулы. Ориентировочными величинами эквивалентных диаметров гранул следует считать размеры 3,0...4,0 мм.

На рисунке 9 представлена фотография созданной установки для проведения опытно-промышленных испытаний гранулирования различных веществ из расплавов в химической, пищевой и других отраслях промышленности.

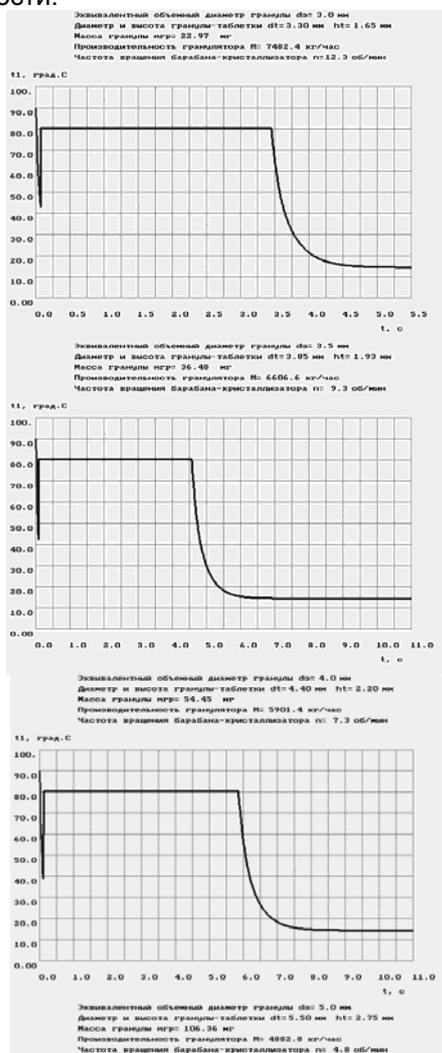


Рисунок 8. Результаты компьютерного моделирования теплопереноса в процессе гранулирования расплава на боковой охлаждаемой поверхности цилиндрического барабана.

ВЫВОДЫ

Разработан высокопроизводительный способ сухого гранулирования путем контактного порционного накапывания расплава на боковую охлаждаемую поверхность вращающегося барабана и оборудование для его реализации.

Созданы компьютерные модели порционного контактного накапывания и теплопереноса в процессе охлаждения и кристаллизации вещества гранул несферической формы на охлаждаемой поверхности барабана, позволяющие определять необходимые значения конструктивных и технологических параметров, а также реализовать оптимальное управление работой узла гранулирования.

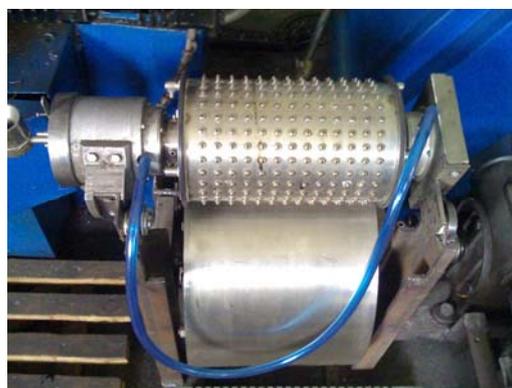


Рисунок 9. Фотография опытно-промышленной установки для гранулирования из расплавов путем порционного контактного накапывания на охлаждаемую боковую поверхность барабана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казакова Е.А. Гранулирование азотосодержащих удобрений. - М.: Химия, 1980.
2. Холин Б.Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости. - М.: Машиностроение, 1977. 182с.
3. Г.В. Леонов, Р.Г. Леонов, В.Н. Хмелев // Ползуновский вестник, № 3. 2010, с. 326-332.
4. Логинов В.В., Леонов Г.В., Бажин В.Е., Чиликин В.Е., Мушаров З.А. Способ сухого гранулирования из расплавов и устройство для его осуществления. Авторское свидетельство СССР №290522. Зарегистрировано 01.03.89.