

УДК 664.848:621.1.013

Профессор А.Н. Остриков

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств. тел. (473) 255-38-87

старший научный сотрудник С.А. Шевцов

(Воронежский институт ГПС МЧС России) тел. (473)-277-86-53

E-mail: oan@vsuet.ru

Professor A.N. Ostrikov

(Voronezh state university of engineering technology) Department of Technology of fats, processes and devices for chemical and food industries. phone (473) 255-38-87

senior researcher S.A. Shevtsov

(Voronezh institute of the state fire emergency service of Russian Ministry of emergency situations). tel (473)-277-86-53

E-mail: oan@vsuet.ru

Расчет и проектирование ленточных сушилок с активным гидродинамическим режимом

Calculation and design of tape dryers with active hydrodynamic regime

Реферат. Ленточные сушилки, используемые в пищевой промышленности, из-за низкого технического уровня уступают по многим технико-экономическим показателям зарубежным аналогам. Целью работы являлась разработка методики расчета ленточных сушилок с активным гидродинамическим режимом на основе полученных теоретических и экспериментальных данных по кинетике и гидродинамике. Выполненный расчет позволил спроектировать ленточную сушилку с активным гидродинамическим режимом. Предлагаемая сушилка имеет следующие преимущества: высокая эксплуатационная надежность из-за отсутствия многочисленных циклов деформации и значительного истирания сетчатых пластин; достижение равномерной сушки продукта вследствие использования мягких, щадящих режимов пересыпания и перемешивания при максимальном сохранении частиц обрабатываемого продукта за счет рациональной конструкции гравитационного ворошителя; универсализация конструкции сушилки и адаптации ее для сушки различных продуктов, отличающихся физико-механическими свойствами (углом естественного откоса, гранулометрическим составом, адгезией и др.); отсутствие необходимости в переналадке конструкции сушилки для продуктов, отличающихся физико-механическими свойствами (углом естественного откоса, гранулометрическим составом, адгезией и др.); использование пересыпающегося слоя снижает комкование высушиваемого продукта и предотвращает образование агломератов.

Summary. Belt dryers, using in the food industry, are inferior in many technical and economic indices foreign counterparts due to low technical level. The aim of the work was to develop a methodology for calculating belt dryers with active hydrodynamic regime on the basis of theoretical and experimental data on the kinetics and hydrodynamics. The executed calculation allowed to design the belt dryer with an active hydrodynamic mode. The offered dryer has the following advantages: high operational reliability due to the lack of numerous cycles of deformation and a considerable abrasion of mesh plates; achievement of uniform drying of a product owing to use of soft, sparing modes of oversleeping and hashing at the maximum preservation of particles of a processed product at the expense of a rational design of a gravitational device for agitating; universalization of a design of the dryer and its adaptation for drying of various products, differing physicomachanical properties (a corner of a natural slope, granulometric structure, adhesion, etc.); lack of need for readjustment of a design of the dryer for the products, differing physicomachanical properties (a corner of a natural slope, granulometric structure, adhesion, etc.); use of a being poured layer reduces a balling of a dried-up product and prevents formation of agglomerates.

Ключевые слова: методика расчета, ленточная сушилка, конструкция

Keywords: method of calculation, belt dryer, design.

Используемые в пищевой промышленности ленточные сушилки из-за низкого технического уровня уступают по многим технико-экономическим показателям зарубежным аналогам [1].

Цель работы – разработка методики расчета ленточных сушилок с активным гидродинамическим режимом на основе полученных теоретических и экспериментальных данных по кинетике и гидродинамике.

Расчет ленточной сушилки выполнили при следующих условиях: производительность сушилки по исходному продукту $G_{\text{мк}} = 100$ кг/ч; влагосодержание гречневой крупы: начальное $C_0 = 0,4$ кг/кг, конечное $C_k = 0,1$ кг/кг; критическое $C_{\text{кр}} = 0,21$ кг/кг, равновесное $C_p = 0,114$ кг/кг; начальная температура гречневой крупы $\theta_0 = 20$ °С; допустимая температура нагрева гречневой крупы

© Остриков А.Н., Шевцов С.А., 2014

$\theta_{\text{доп}} = 80^\circ\text{C}$; удельная теплоемкость гречневой крупы $c_t = 1,25 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$; насыпная плотность гречневой крупы $\rho_{\text{нас}} = 825 \text{ кг/м}^3$; плотность частиц гречневой крупы $\rho_{\text{мк}} = 1220 \text{ кг/м}^3$; эквивалентный диаметр частицы $d_0 = 2,7 \text{ мм}$; фактор формы $f = 1,5$; сушильный агент – воздух при начальном влагосодержании $X_0 = 0,01 \text{ кг/кг}$.

Производительность сушилки по сухому продукту G_t , кг/ч, исходному материалу W , кг/ч, и испарившейся влаге $G_{\text{мо}}$, кг/ч, рассчитаем по формулам:

$$G_t = \frac{G_{\text{мк}}}{1 + C_k}, \quad (1)$$

$$W = G_t \Delta C, \quad (2)$$

$$G_{\text{мо}} = G_{\text{мк}} + W, \quad (3)$$

где $G_{\text{мк}}$ – производительность сушилки, кг/ч, $G_{\text{мк}} = 100 \text{ кг/ч}$; C_k – конечное влагосодержание гречневой крупы, кг/кг, $C_k = 0,1 \text{ кг/кг}$; ΔC – изменение влагосодержания гречневой крупы кг/кг, $\Delta C = 0,3 \text{ кг/кг}$.

Температурный режим сушки выберем по фактору термообработки из условия $\Phi_t \leq 1$.

Учитывая, что в ленточной сушилке $\tau > \tau^\#$ и обеспечивается высокая степень перемешивания воздуха, воспользуемся формулой:

$$\Phi_t = \frac{(t_o + t_k)}{2\theta_{\text{доп}}} J \leq 1, \quad (4)$$

$$t_o = 2\theta_{\text{доп}} - t_k, \quad (5)$$

где $t_o = 20^\circ\text{C}$ – начальная температура гречневой крупы; $t_k = 40^\circ\text{C}$ – конечная температура гречневой крупы; $\theta_{\text{доп}} = 80^\circ\text{C}$ – допустимая температура нагрева гречневой крупы.

Температуру θ_k гречневой крупы на выходе из сушилки примем по формуле:

$$\theta_k = 0,9 \cdot t_k, \quad (6)$$

где $t_k = 40^\circ\text{C}$ – конечная температура гречневой крупы.

Удельный расход теплоты на нагрев гречневой крупы g_m , кДж/кг, составит:

$$g_m = \frac{(c_t + c_{\text{ж}} \cdot C_k) \cdot \Delta\theta}{\Delta C}, \quad (7)$$

$$\Delta\theta = \theta_k - \theta_o, \quad (8)$$

где $c_t = 1,25 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ – удельная теплоемкость гречневой крупы, кДж/(кг·K); $c_{\text{ж}} = 4,186 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·K); $\Delta\theta = 16^\circ\text{C}$ – разность температур на выходе из сушилки и входе в сушилку.

Среднюю удельную теплоту связанной влаги $\bar{g}_c$, кДж/кг, определим по формуле:

$$\bar{g}_c = \frac{a \cdot (C_{\text{кр}} - C_k)^2}{\Delta C}, \quad (9)$$

где $a = 4200$ – постоянная величина, кДж/кг;

Принимаем удельные тепловые потери $g_{\text{пт}} = 250 \text{ кДж/кг}$. При установившемся процессе расход теплоты на нагрев транспортных средств отсутствует. Тогда изменение энтальпии Δ , кДж/кг, сушильного агента рассчитаем по формуле:

$$\Delta = c_{\text{ж}} \cdot \theta_o - g_m - \bar{g}_c - g_{\text{пт}}, \quad (10)$$

где $c_{\text{ж}} = 4,186 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ – удельная теплоемкость воздуха; $\theta_o = 20^\circ\text{C}$ – начальная температура материала; $g_m = 88,9 \text{ кДж/кг}$ – удельный расход; $\bar{g}_c = 84,7 \text{ кДж/кг}$ – средняя удельная теплота кДж/кг.

Энтальпия воздуха в начале процесса I_o , кДж/кг:

$$I_o = c_r t_o + (r_o + c_{\text{пт}} t_o) X_o, \quad (11)$$

где $c_r = 1,006 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ – удельная теплоемкость наружного воздуха; $r_o = 2495 \text{ кДж/кг}$ – удельная теплота парообразования при 0°C ; $c_{\text{пт}} = 1,965 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ – удельная теплоемкость пара; $t_o = 120^\circ\text{C}$ – начальная температура продукта; $X_o = 0,01 \text{ кг/кг}$ – начальное влагосодержание воздуха, поступающего в калорифер.

Энтальпия пара, содержащегося в воздухе, в конце процесса $I_{\text{пк}}$, кДж/кг

$$I_{\text{пк}} = r_o + c_{\text{пт}} t_k, \quad (12)$$

где $c_{\text{пт}}$ – удельная теплоемкость пара, кДж/(кг·K), $c_{\text{пт}} = 1,965 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$; t_k – конечная температура продукта, $^\circ\text{C}$, $t_k = 40^\circ\text{C}$.

Энтальпия воздуха в конце процесса I_k , кДж/кг:

$$I_k = \frac{c_r t_k \Delta + I_{\text{пк}} (X_o \Delta - I_o)}{\Delta - I_{\text{пк}}}, \quad (13)$$

где $c_r = 1,006 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ – удельная теплоемкость наружного воздуха; $\Delta = -339,88 \text{ кДж/кг}$ – изменение энтальпии; $I_{\text{пк}} = 2573,6 \text{ кДж/кг}$ – энтальпия пара, содержащегося о воздухе, в конце процесса; $I_o = 148 \text{ кДж/кг}$ – энтальпия воздуха в начале процесса.

Влагосодержание воздуха в конце процесса X_k , кг/кг:

$$X_k = \frac{I_k - I_o}{\Delta} + X_o, \quad (14)$$

где $I_k = 138,4 \text{ кДж/кг}$ – энтальпия воздуха в конце процесса кДж/кг.

Изменение влагосодержания воздуха ΔX , кг/кг:

$$\Delta X = X_k - X_o, \quad (15)$$

где X_k – влагосодержание воздуха в конце процесса, кг/кг, $X_k = 0,038 \text{ кг/кг}$.

Удельный расход воздуха σ , кг/кг:

$$\sigma = \frac{\Delta C}{\Delta X}, \quad (16)$$

где ΔC – изменение влагосодержания материала кг/кг, $\Delta C = 0,3 \text{ кг/кг}$.

Расход воздуха L , кг/ч:

$$L = \sigma G_T, \quad (17)$$

где $\sigma = 10,7$ кг/кг – удельный расход воздуха.

Кинетику сушки рассчитаем по методу А. В. Лыкова. Графическим дифференцированием опытной кривой кинетики сушки (рисунок 1) построим кривую скорости сушки, которую заменим прямой, проведенной с минимальной погрешностью.

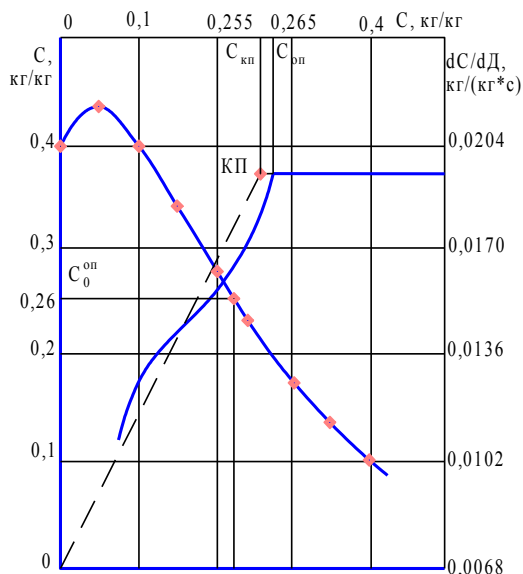


Рисунок 1. Кривая сушки и кривая скорости сушки гречневой крупы

Критическая точка КП соответствует критическому приведенному влагосодержанию $C_{кп} = 0,255$ кг/кг. Скорость сушки в первый период для опытных данных рассчитаем из соотношения, учитывая, что $C_{оп} = 0,4$ кг/кг, находим по формуле:

$$N = \frac{C_{оп} - C_{кр}}{\tau_I^{оп}}, \quad (18)$$

где $C_{кр} = 0,21$ кг/кг – абсолютное критическое влагосодержание; $\tau_I^{оп}$ – время сушки, ч, $\tau_I^{оп} = 0,36$ ч = 22 мин.

Тогда длительность первого периода сушки для сушилки от $C_0 = 0,4$ кг/кг до $C_{кп} = 0,255$ кг/кг составит:

$$\tau_I = \frac{C_0 - C_{кп}}{N}, \quad (19)$$

где $C_0 = 0,4$ кг/кг – абсолютное начальное влагосодержание; $C_{кп} = 0,255$ кг/кг – критическое приведенное влагосодержание; $N = 0,527$ ч⁻¹ – скорость сушки в первый период.

Коэффициент сушки K , ч⁻¹, согласно формуле:

$$K = \frac{N}{C_{кп} - C_p}, \quad (20)$$

где $C_{кп} = 0,255$ кг/кг – критическое приведенное влагосодержание; $C_p = 0,114$ кг/кг – абсолютное равновесное влагосодержание, кг/кг.

Длительность второго периода сушки τ_{II} , ч:

$$\tau_{II} = \frac{1}{K} \cdot \ln \frac{C_{кп} - C_p}{C_k - C_p}, \quad (21)$$

где $K = 3,74$ ч⁻¹ – коэффициент сушки; $C_{кп} = 0,255$ кг/кг – критическое приведенное влагосодержание.

Полное время сушки τ , ч:

$$\tau = \tau_I + \tau_{II}, \quad (22)$$

где τ_I – длительность первого периода сушки для сушилки, ч, $\tau_I = 0,275$ ч; $\tau_{II} = 0,381$ ч – длительность второго периода сушки.

Масса сухого материала в сушилке g_T , кг:

$$g_T = G_T \tau, \quad (23)$$

где G_T – производительность сушилки по сухому продукту кг/ч, $G_T = 91$ кг/ч; $\tau = 0,656$ ч – полное время сушки.

Принимаем нагрузку сухого материала на ленту. Тогда требуемая поверхность ленты S , м²:

$$S = g_T / g_T^*, \quad (24)$$

где $g_T = 238,5$ кг – масса сухого материала в сушилке; $g_T^* = 85$ кг/м² – нагрузка сухого материала на ленту.

Нагрузка на ленту в начале процесса $g_{мо}^*$, кг/м²:

$$g_{мо}^* = g_T^* (1 + C_0), \quad (25)$$

Нагрузка на ленту в конце процесса $g_{мк}^*$, кг/м²:

$$g_{мк}^* = g_T^* (1 + C_k). \quad (26)$$

Высота слоя материала на ленте h , м:

$$h = g_{мк}^* / \rho_{нас}, \quad (27)$$

где $g_{мк}^* = 93,5$ кг/м² – нагрузка на ленту в конце процесса; $\rho_{нас} = 825$ кг/м³ – насыпная

плотность продукта; $h = \frac{93,5}{825} = 0,1$ м, что в пределах рекомендуемых величин.

Условная скорость воздуха в свободном сечении сушилки ($S_{св} = 1,2$ м²) при условиях конца процесса:

$$w = \frac{L \cdot (1 + X_k)}{\rho_k \cdot S_{св}}, \quad (28)$$

где L – расход воздуха, кг/ч, $L = 973,7$ кг/ч; $\rho_k = 1,128$ кг/м³ – плотность воздуха при $t = 40$ °C, кг/м³.

Для оценки уноса материала с отработанным воздухом рассчитаем скорость витания частиц, используя формулы:

$$Re_B = \frac{\sqrt{\frac{367 + k_3 \cdot Ag}{k_1 \cdot k_2}} - 19,15}{0,588 \cdot k_3}, \quad (29)$$

$$u_B = \frac{Re_B \cdot \nu}{d_3}, \quad (30)$$

$$k_3 = 11 - \frac{10}{f}. \quad (31)$$

Критерий Архимеда Ag_i :

$$Ag_i = \frac{g \cdot d_3^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_m - \rho}{\rho}, \quad (32)$$

где $d_3 = 0,0027$ м – эквивалентный диаметр; $f = 1,5$ – фактор формы частиц; $\nu = 16,96 \cdot 10^{-6}$ м²/с – вязкость; $\rho = 1,128$ кг/м³ – плотность воздуха при $t = 40$ °С, кг/м³.

Выполним расчет общего сопротивления движению транспортирующей ленты. Определяем коэффициенты планового использования сушилки по времени в сутки $K_{вс}$ и $K_{вг}$ в год:

$$K_{вс} = t_{пс} / t_c, \quad (33)$$

$$K_{вг} = t_{пг} / t_r, \quad (34)$$

где $t_{пс}$ – продолжительность работы сушилки за сутки, ч, $t_{пс} = 14$ ч; t_c – продолжительность суток, ч, $t_c = 24$ ч; $t_{пг}$ – продолжительность работы сушилки за год, ч, $t_{пг} = 4270$ ч; $t_r = 8760$ ч – продолжительность года.

Коэффициент использования по производительности $K_{зг}$ рассчитываем по формуле:

$$K_{зг} = \frac{Q_c}{Q_m}, \quad (35)$$

где $Q_c = 72$ кг/ч – плановая средняя массовая производительность сушилки; $Q_m = 1400$ кг/сутки – максимальная производительность.

Находим расчетную производительность сушилки $Q_{рм}$, кг/ч, для определения ширины ленты:

$$Q_{рм} = \frac{Q_m}{T \cdot K_3}, \quad (36)$$

где $T = t_{пс} = 14$ ч – продолжительность работы сушилки за сутки; $K_3 = 0,75$ – общий эксплуатационный коэффициент:

$$K_3 = K_{вс} K_{вг} K_{зг}. \quad (37)$$

Предполагаем, что лента должна иметь ширину в пределах 600-800 мм; тогда принимаем скорость движения ленты $\mathcal{G} = 0,0016$ м/с. Для груза средней подвижности принимаем коэффициент площади поперечного сечения груза на ленте $K_n = 550$.

Необходимая ширина ленты B_n , м, рассчитывается по формуле:

$$B_p = 1,1 \cdot \left(\sqrt{\frac{Q_{рм}}{K_n \cdot \mathcal{G} \cdot \rho}} + 0,05 \right), \quad (38)$$

где $Q_{рм} = 0,133$ т/ч – расчетная производительность сушилки; $\rho = 0,825$ т/м³ – насыпная плотность.

Выбираем расстояния между роlikо-опорами на верхней направляющей $l_{р.в} = 0,4$ м; на нижней; $l_{р.н} = 0,4$ м. Массы вращающихся частей роlikоопор $m_{р.в} = 7$ кг; $m_{р.н} = 10$ кг. Отсюда линейные силы тяжести:

$$q_{р.в} = \frac{g \cdot m_{р.в}}{l_{р.в}}, \quad (39)$$

$$q_{р.н} = \frac{g \cdot m_{р.н}}{l_{р.н}}, \quad (40)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Линейную силу тяжести груза $Q_{р.с}$, кг/ч, определяем по средней производительности:

$$Q_{р.с} = \frac{Q_c}{T \cdot K'_3}, \quad (41)$$

где $K'_3 = 0,68$ – коэффициент линейной силы тяжести груза.

Тогда находим линейную силу тяжести груза q_r , Н/м:

$$q_r = \frac{g \cdot Q_{р.с}}{3,6 \cdot \mathcal{G}}, \quad (42)$$

где $\mathcal{G} = 0,0016$ м/с – скорость движения ленты.

Общее сопротивление движению ленты W , Н, определяем:

$$W = K_T \cdot L_r \cdot \left[(q_r + q_{р.в} + q_l) \cdot w_b + (q_l + q_{р.н}) \right], \quad (43)$$

где $K_T = 5,1$ – коэффициент сопротивления движения ленты; $L_r = 2,5$ м – длина горизонтальной проекции расстояния между осями концевых звездочек сушилки; q_l – линейная сила тяжести ленты, Н/м, $q_l = g \cdot m_l = 9,81 \cdot 5 = 49,05$ Н/м; $w_b = 1,06$ – коэффициент сопротивления движению ленты.

Проведем кинематический и силовой расчет привода. Привод сушильной установки состоит из электродвигателя, червячного редуктора, клиноременной передачи и цепной передачи.

Общий КПД привода:

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3, \quad (44)$$

где η_1 – КПД клиноременной передачи, $\eta_1 = 0,96$; $\eta_2 = 0,8$ – КПД червячного редуктора; $\eta_3 = 0,95$ – КПД цепной передачи.

Мощность привода сушилки определяют по формуле:

$$N = \frac{K_3 \cdot W \cdot \mathcal{G}}{1000 \cdot \eta}, \quad (45)$$

где $K_3 = 1,2$ – коэффициент неучтенных потерь; $\eta = 0,74$ – КПД привода; W – производительность аппарата, т/ч; $\mathcal{G} = 0,0016$ м/с – скорость движения ленты.

Для привода выбираем двигатель 4А80А4УЗ, мощность $N_3 = 1,1$ кВт, $n = 1500$ мин⁻¹.

Общее передаточное число привода:

$$u = u_1 u_2 u_3, \quad (46)$$

где u_1 – передаточное число клиноременной передачи, приму $u_1 = 3,95$; u_2 – передаточное число червячного редуктора, приму $u_2 = 50$; u_3 – передаточное число цепной передачи, принимаем $u_3 = 4$.

Частота вращения ведущего шкива равна частоте вращения вала электродвигателя $n_1 = n_3 = 1500$ мин⁻¹.

Угловая скорость вращения ведущего шкива:

$$\omega_1 = \omega_3 = \pi n_3 / 30. \quad (47)$$

Мощность N_1 и крутящий момент T_1 на валу ведущего шкива равны мощности и крутящему моменту электродвигателя:

$$N_1 = N_3 = 1,1 \text{ кВт.}$$

Частота вращения ведомого шкива:

$$n_2 = n_1 / u_1, \quad (48)$$

где u_1 – передаточное число клиноременной передачи; n_1 – частота вращения электродвигателя, мин⁻¹.

Угловая скорость ведомого шкива:

$$\omega_2 = 3,14 \times 379,7 / 30 = 39,74 \text{ с}^{-1}.$$

Мощность на ведомом валу клиноременной передачи (входном валу редуктора):

$$N_2 = N_1 \eta_1, \quad (49)$$

где N_1 – мощность электродвигателя, кВт; η_1 – КПД клиноременной передачи.

Крутящий момент на входном валу редуктора:

$$T_2 = N_2 / \omega_2, \quad (50)$$

где N_2 – мощность на входном валу редуктора, кВт; ω_2 – угловая скорость ведомого шкива, с⁻¹.

Частота вращения входного вала редуктора $n_2 = 30 \times 39,74 / 3,14 = 379,7$ мин⁻¹.

Частота вращения ведущей звездочки цепной передачи (выходного вала редуктора):

$$n_3 = n_2 / u_2, \quad (51)$$

где n_2 – частота вращения ведущей звездочки, мин⁻¹; u_2 – передаточное число редуктора.

Мощность на выходном валу редуктора:

$$N_3 = N_2 \eta_2, \quad (52)$$

где N_2 – мощность на входном валу редуктора, кВт; η_2 – КПД червячного редуктора.

Крутящий момент на выходном валу редуктора:

$$T_3 = N_3 / \omega_3, \quad (53)$$

где N_3 – мощность на выходном валу редуктора, кВт; ω_3 – угловая скорость выходного вала редуктора, с⁻¹.

Частота вращения ведомой звездочки:

$$n_4 = n_3 / u_3, \quad (54)$$

где n_3 – частота вращения ведущей звездочки,

мин⁻¹; u_3 – передаточное число цепной передачи.

Угловая скорость ведомой звездочки:

$$\omega_4 = 3,14 \times 1,9 / 30 = 0,19 \text{ с}^{-1}.$$

Мощность на валу звездочки:

$$P_4 = P_3 \eta_3, \quad (55)$$

где P_3 – мощность на выходном валу редуктора, кВт; η_3 – КПД цепной передачи.

Крутящий момент на валу звездочки:

$$T_4 = P_4 / \omega_4, \quad (56)$$

где P_4 – мощность на валу шнека, кВт; ω_4 – угловая скорость шнека, с⁻¹.

Далее представлен расчёт и подбор калорифера. Для нагревания воздуха выбираем пластинчатые калориферы КФБ-9, обогреваемые паром с температурой $T_n = 220$ °С ($P_{\text{абс}} = 23,66$ ат).

Тепловую нагрузку на калориферы определим как количество теплоты на сушку в зимних условиях $Q = 269752,0$ Вт и количество теплоты на компенсацию тепловых потерь от газахода в окружающую среду $Q_{\text{пот}} = 567,2$ Вт, т. е.:

$$Q_{\text{кол}} = Q + Q_{\text{пот}} = 270319,2 \text{ Вт.} \quad (57)$$

Площадь поверхности теплопередачи калориферов определим из основного уравнения теплопередачи:

$$F_{\text{кал}} = \frac{Q_{\text{кал}} \cdot l_3}{k \cdot \Delta t_{\text{ср}}}, \quad (58)$$

где $Q_{\text{кал}}$ – тепловая нагрузка калориферов, Вт; k – коэффициент теплопередачи в калорифере; $\Delta t_{\text{ср}}$ – средний температурный напор между паром и воздухом в калорифере, °С; $l_3 = 1,15$ – коэффициент запаса.

Определим $\Delta t_{\text{ср}}$:

$$\begin{array}{ccc} T_n = 220 \text{ °С} & \xrightarrow{\text{Пар}} & T_k = 220 \text{ °С} \\ t_n = 20 \text{ °С} & \xleftarrow{\text{Воздух}} & 100 \text{ °С} \\ \Delta t_6 = 220 \text{ °С} & & \Delta t_m = 120 \text{ °С} \end{array}$$

$$\frac{\Delta t_6}{\Delta t_m} = \frac{220}{120} = 1,83 < 2, \text{ следовательно}$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_m}{2} = \frac{220 + 120}{2} = 170 \text{ °С.}$$

Коэффициент теплоотдачи калорифера выберем из [3, табл. 1-336]; $k = 20,8$ Вт/(м²·К).

Число необходимых калориферов:

$$N = \frac{F_{\text{кал}}}{F_0} = \frac{87,9}{53,3} = 1,65 \text{ шт.}, \quad (59)$$

где $F_0 = 53,3$ м² – площадь поверхности нагрева калорифера КФБ – 9 [3, табл. 1 – 33а].

Принимаем два калорифера и устанавливаем их по одному по ходу движения воздуха.

Средняя температура воздуха в калорифере:

$$t_{\text{ср}} > \frac{t_0 + t_1}{2} = \frac{20 + 100}{2} = 60 \text{ °С.} \quad (60)$$

Объёмный расход воздуха:

$$V = \frac{L}{\rho_v} = \frac{1,298}{0,96} = 1,35 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (61)$$

где $L = 1,298 \text{ кг/с}$ – расход сухого воздуха на сушку в зимних условиях.

Скорость воздуха в живом сечении калорифера:

$$v = \frac{V}{n' \cdot f} = \frac{1,35}{1 \cdot 0,486} = 2,78 \text{ м/с}, \quad (62)$$

где $n' = 1$ – число калориферов в одном ряду; $f = 0,486 \text{ м}^2$ – живое сечение калорифера для воздуха [23, табл. 1 – 33а].

Массовая скорость воздуха:

$$\omega = v \cdot \rho_v = 2,78 \cdot 0,96 = 2,67 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (63)$$

По [3, табл. 1 – 33а] для массовой скорости воздуха $\omega = 2,67 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ определяем сопротивление одного ряда калориферов $\Delta p_0 = 3 \text{ мм. вод. ст.}$

Общее сопротивление калориферов:

$$\Delta p_{\text{кал}} = \Delta p_0 \cdot n = 3 \cdot 2 = 6 \text{ мм. вод. ст.} \quad (64)$$

Расход греющего пара:

$$G_{\text{гп}} = \frac{Q_{\text{кал}}}{r \cdot \eta} = \frac{270319,2}{1860000 \cdot 0,9} = 0,161 \text{ кг/с}, \quad (65)$$

где $r = 1860 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ – удельная теплота конденсации пара [12]; $\eta = 0,9$ – коэффициент, учитывающий потери теплоты в калорифере.

Результаты расчета приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Результаты расчета ленточной сушилки с активным гидродинамическим режимом для сушки гречневой крупы

Показатели и его размерность	Значение
Производительность по сухому продукту $G_{\text{т}}$, кг/ч	91
Производительность по исходному продукту W , кг/ч	27,3
Производительность по испарившейся влаге $G_{\text{мо}}$, кг/ч	127,3
Фактор термообработки $\Phi_{\text{т}}$	0,375
Удельный расход теплоты на нагрев крупы $g_{\text{м}}$, кДж/кг	88,9
Число Рейнольдса Re	639
Число Архимеда Ag	623000
Мощность привода сушилки N , кВт	1,09

Выполненный расчет позволил спроектировать ленточную сушилку с активным гидродинамическим режимом (рисунки 2, 3), которая включает корпус 1, загрузочный бункер 2 с ротационным питателем 17, патрубок 3 для отвода отработанного теплоносителя, два цепных транспортера 4, выгрузочный бункер 5 для выгрузки высушенного продукта из сушилки, патрубок 6 для подвода теплоносителя,

гравитационные ворошители 7, сетчатые пластины 8, верхнюю 9 и нижнюю 14 направляющие, регулируемый привод 10.

В боковых стенках корпуса 1 расположены параллельные горизонтальные пазы 11 с находящимися в них цепными транспортерами 4, на которых с определенным шагом расположены сетчатые пластины 8 (рисунок 4). Параллельные горизонтальные пазы 11 заканчиваются в зоне выгрузки высушенного продукта. Сетчатые пластины 8 шарнирно закреплены с помощью осей 12 на звеньях цепных транспортеров 4. Два цепных транспортера 4 натянуты между четырьмя парами цепных звездочек 13.

На верхней рабочей части цепных транспортеров 4 над сетчатыми пластинами 8 размещены гравитационные ворошители 7, представляющие собой наклонные лопатки 15 клиновидной формы (в лопатках могут также сбоку выфрезерованы пазы), установленные в два последовательно расположенных ряда (рисунок 4). За лопатками 15 установлен выравниватель высоты слоя обрабатываемого продукта 16. Выравниватель высоты слоя 16 устанавливает заданную высоту слоя продукта (см. h на рисунке 3). Число ворошителей 7 определяется физико-химическими свойствами высушиваемого продукта, длиной сушилки и необходимостью равномерного высушивания. Цепные транспортеры 4, с расположенными на них с определенным шагом сетчатыми пластинами 8, приводятся в движение регулируемым приводом 10.

Сходящиеся по плавной траектории верхняя 9 и нижняя 14 направляющие, контактирующие с горизонтальным пазом 11, обеспечивают перемещение сетчатых пластин 8 из вертикального положения в горизонтальное.

Высушиваемый продукт постепенно перемещается вместе с сетчатыми пластинами 8, подвергаясь сушке, к выгрузочному бункеру 5 для удаления высушенного продукта из сушилки. Режим работы регулируемого привода 10 может меняться в зависимости от требуемого режима сушки: он может совершать как непрерывное движение; так и периодическое движение с выстоями.

Гидродинамический режим перемещения высушиваемого продукта в сочетании с заданными параметрами теплоносителя позволяет выбрать оптимальный режим сушки с учетом изменения влагосодержания продукта.

Выгрузка высушенного продукта из сушилки происходит путем опускания переднего края сетчатой пластины 8 в нижнее положение за счет выхода последней из пазов 11. Таким образом, пластины 8, находящиеся в вертикальном положении после выгрузки продукта, по холостой ветви цепных транспортеров 4

возвращаются в начало сушилки. При этом вертикальное положение пластин 8, достигаемое за счет их шарнирного крепления с помощью оси 12 к цепным транспортерам 4, способствует более равномерному распределению теплоносителя, подаваемого из патрубка 6 под пластины 8. Адаптированный в соответствии с

кинетическими закономерностями процесса сушки перемешивание продукта на поверхности сетчатых пластин 8 с помощью ворошителей 7 позволяет выбрать рациональные режимы сушки с учетом изменения влагосодержания продукта по длине сушилки.

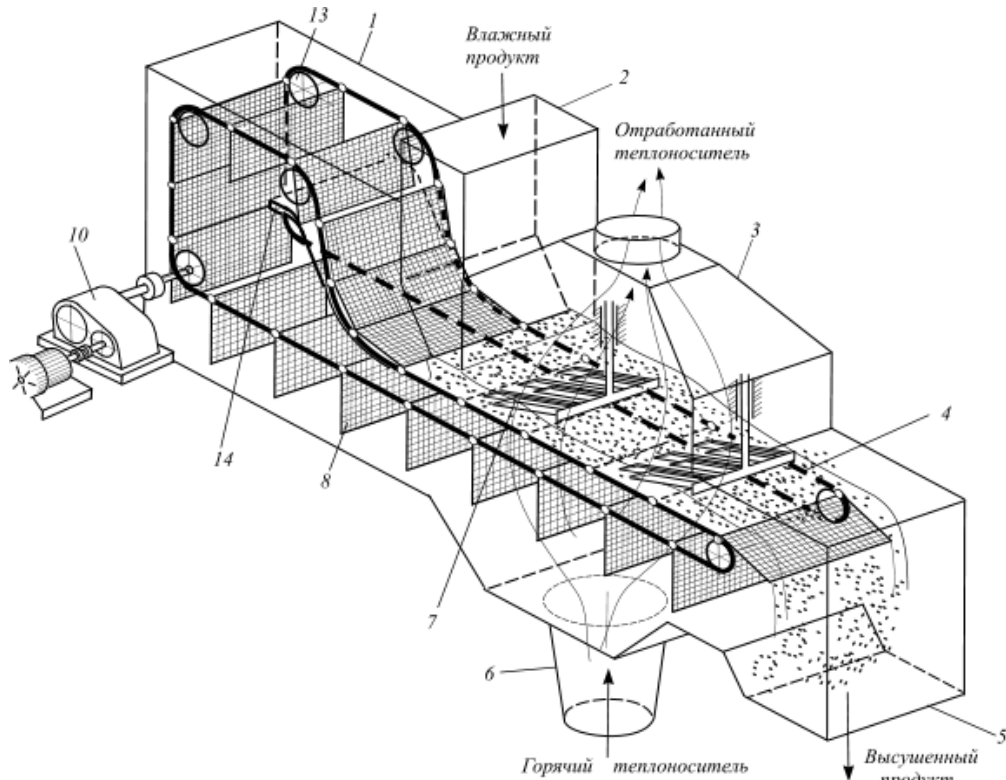


Рисунок 2. Сушилка: 1 – корпус; 2 – загрузочный бункер; 3 – патрубок для отвода отработанного теплоносителя; 4 – цепной транспортер; 5 – выгрузочный бункер; 6 – патрубок для подвода теплоносителя; 7 – гравитационные ворошители; 8 – сетчатые пластины; 9 – верхняя направляющая; 10 – регулируемый привод; 11 – горизонтальные пазы; 12 – оси; 13 – цепные звездочки; 14 – нижняя направляющая; 15 – наклонные лопатки; 16 – выравниватель высоты слоя

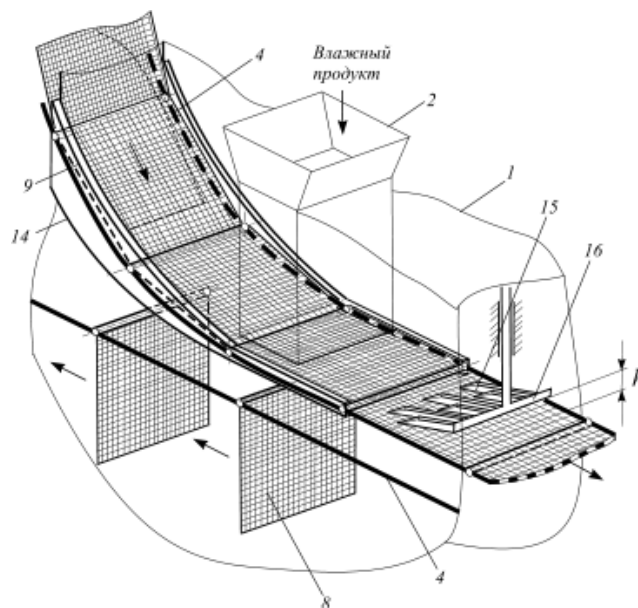


Рисунок 3. Схема перемещения сетчатых пластин из вертикального положения в горизонтальное

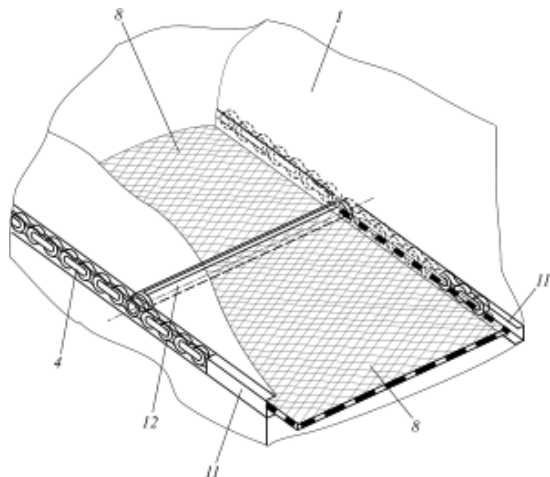


Рисунок 4. Цепной транспортер с сетчатой пластиной

Предлагаемая сушилка имеет следующие преимущества: высокая эксплуатационная надежность из-за отсутствия многочисленных циклов деформации и значительного

истирания сетчатых пластин; достижение равномерной сушки продукта вследствие использования мягких, щадящих режимов пересыпания и перемешивания при максимальном сохранении частиц обрабатываемого продукта за счет рациональной конструкции гравитационного ворошителя; универсализация конструкции сушилки и адаптации ее для сушки различных продуктов, отличающихся физико-механическими свойствами (углом естественного откоса, гранулометрическим составом, адгезией и др.); отсутствие необходимости в переналадке конструкции сушилки для продуктов, отличающихся физико-механическими свойствами (углом естественного откоса, гранулометрическим составом, адгезией и др.); использование пересыпающегося слоя снижает комкование высушиваемого продукта и предотвращает образование агломератов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1973. 528 с.
- 2 Лыков А.В. Тепломассообмен. М.: Энергия, 1978. 479 с.
- 3 Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. М.: Химия, 1970. 432 с.
- 4 Лыков М. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1966. 236 с.
- 5 Плановский А.Н., Рамм В.М., Коган С.З. Процессы и аппараты химической технологии. Л.: Химия, 1983. 676 с.

REFERENCES

- 1 Ginzburg A.S. Osnovy teory i tekhniki sushki pishchevyh productov [Fundamentals of the theory and technique of drying foods]. Moscow, Pishchevaia promyshlennost', 1973. 528 p. (In Russ.).
- 2 Lykov A.V. Teplomassoobmen [Heat and mass transfer]. Moscow, Energiia, 1978. 479 p. (In Russ.).
- 3 Lykov M.V. Sushka v khimicheskoi promyshlennosti [Drying in chemical industry]. Moscow, Khimiia, 1970. 432 p. (In Russ.).
- 4 Lykov A.V. Teoria sushki [Drying theory]. Moscow, Energiia, 1968. 470 p. (In Russ.).
- 5 Planovskii A.N., Ramm V.M., Kagan S.Z. Protsessy i apparaty v khimicheskoi tekhnologii [Processes and devices of chemical technology]. Leningrad, Khimiia, 1983. 676 p. (In Russ.).