

УДК 532.529

Волчков Э.П., Дворников Н.А., Ядыкин А.Н.

Институт теплофизики СО РАН, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУШКИ И УДЕРЖАНИЯ ЗЕРНА В ВИХРЕВЫХ КАМЕРАХ С ПРОТОКОМ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ СЛОЙ ЗЕРНА

Наведено метод розрахунку утримання та теплообміну шару зернистого матеріалу у вихровій камері при подачі закрученого потоку повітря через бокові стінки, на яких утримується шар. Тепломасообмін газу із зернистим матеріалом моделювався з врахуванням змінної температури всередині окремих зерен. Наведно експериментальні дані авторів щодо швидкості обертання шару, нагріву зерен та їх сушки на прикладі зерен пшениці. Дані задовільно описуються запропонованою моделлю розрахунку.

Предложен метод расчета удержания и теплообмена слоя зернистого материала в вихревой камере при подаче закрученного потока воздуха через боковые стенки, на которых удерживается слой. Теплообмен газа с зернистым материалом моделировался с учетом переменной температуры внутри отдельных зерен. Приводятся экспериментальные данные авторов по скорости вращения слоя, нагреву зерен, и сушке на примере зерен пшеницы. Данные удовлетворительно описываются предложенной моделью расчета.

The simulation method for heat and mass transfer in a granular material layer in a vortex chamber is proposed, as well as calculations of the holdup of this layer by swirl air flow injected through the lateral walls where this granular material is kept on. As the swirl air flow passes through the layer, the granular material is being heated by the gas flow, thus a part of the layer's angular momentum as spent for friction on the wall. Heat and mass transfer between air and granular material was simulated with account of a variable temperature inside separate grains. Author's experimental data of granular layer rotation velocity, heating and drying of grains for case of wheat grains are presented. These data are close to the simulation results.

$$Ar = \frac{g_s d_{eff}^3}{m} r(r_p - r) - \text{число Архимеда};$$

b – толщина слоя частиц;

c_{pp} – теплоемкость влажного зерна;

G – расход воздуха;

$g_s = \Omega^2 R_s \cos \alpha + g \sin \alpha$ – ускорение в направлении по нормали к стенке в среднем сечении завихрителя;

H_c – удельная теплота испарения влаги;

l – длина стенки камеры вдоль образующей;

N – скорость сушки;

q_p – удельный тепловой поток к частицам;

r – радиальная координата поверхности слоя;

R_2 и R_1 – радиус камеры сверху, откуда подается материал, и радиус нижней диафрагмы;

$$Re = \frac{\rho d_{eff} V_n}{\mu} - \text{число Рейнольдса для частиц, построенное по средней скорости, нормальной к стенке};$$

t_a – температура газа в градусах Цельсия;

t_p, t_{ps}, t_{p0} – средняя температура частицы, температура поверхности частицы и температура частицы в начальный момент времени прогрева;

Tu – отношение объема, занимаемого частицами, к объему слоя;

u_{p0} – тангенциальная скорость материала при попадании в камеру;

v_{a0} – скорость газа до вхождения газа в слой;

V_n – нормальная к стенке средняя скорость газа;

W – массовая доля воды в зерне;

W_0 – массовая доля воды в зерне в начальный момент времени;

x – осевое расстояние от верхнего среза камеры до данной точки поверхности слоя;

x_1 – высота камеры;

β – коэффициент трения слоя о стенку;

$\epsilon = 1 - Tu$ – порозность слоя;

μ – вязкость газа;

Ω – угловая скорость вращения слоя;

ψ – среднее относительное проходное сечение газа в слое;

$\rho_p = \rho_c / Tu$ – плотность вещества, из которого состоят частицы;

ρ_{a0} – плотность газа до вхождения газа в слой;

ρ_a – плотность газа

τ – время сушки.

В Институте теплофизики более 20 лет проводились исследования по разработке и применению вихревых аппаратов для очистки и подсушки зернистых материалов. Разработан и прошел испытания ряд вихревых аппаратов производительностью от 1 до 30 т/ч. Эти аппараты имеют небольшие габариты и используются в частности, с целью предварительной подсушки и очистки зерна при засыпке зерна в бурты на токах, что позволяет значительно увеличить (до двух недель) срок хранения влажного зерна без его возгорания. Кроме этого, использование этих аппаратов для предварительного подогрева и очистки зерна перед подачей в шахтные сушилки позволяет увеличить производительность шахтных сушилок в полтора раза. Вихревые аппараты применялись также для тепло и массообменных процессов при использовании других гранулированных материалов, в частности пластмасс. Однако при переходе с одних материалов на другие, а также при изменении производительности и размеров аппаратов возникают проблемы с обеспечением удержания материалов в вихревой камере и получения заданных характеристик аппарата. Поэтому возникает необходимость в разработке простых методов расчета этих вихревых аппаратов.

1. Тепло и массообмен в слое гранулированного материала, продуваемого газом

Известно, что для гранулированных материалов, изменение влажности материала от времени можно задать [1]

$$\frac{dW}{dt} = -N, \quad (1)$$

или

$$W = W_0 \exp(-N\tau), \quad (2)$$

а скорость сушки, [2]

$$N = aW_0 t_a \sqrt{\rho_a v_{a0}} \cdot (\rho_p \cdot Tu \cdot H_c)^{-0.55} + b. \quad (3)$$

Здесь $a=0.00000346$, $c=0.000111$ – константы, для пшеницы. Очевидно, что скорость сушки, определенная по (3), не учитывает ряда важных параметров, в частности, температуры частиц зерна перед сушкой, а также давления насыщенных паров воды при температуре обдуваемого частицы газа. Однако в случае высоких температур газа, когда давление насыщенных паров намного превышает давление паров воды в подводимом воздухе, этим влиянием можно пренебречь. Учет влияния предварительного подогрева зерна осуществлялся на основе экспериментальных данных из работы [3]. Экспериментальные данные по сушке зерна при его предварительном подогреве аппроксимировались зависимостью аналогичной (2)

$$W_1 = (W_0 - W_h) \cdot \exp(-N\tau) \quad (4)$$

где $W_h = W_L \cdot (1 - \exp(-\tau/\tau_e))$ – изменение влажности связанное с испарением влаги из предварительно подогретого зерна, $\tau_e = 100$ секунд для пшеницы согласно экспериментальным данным [3],

$$W_L = \frac{(t_{p0} - t_{ref})c_{pp}}{H_L} -$$

изменение влажности зерна при его охлаждении от температуры t_{p0} до $t_{ref} = 10^\circ\text{C}$ если вся теплота при охлаждении зерна идет на испарение влаги зерна. Зависимость (4) позволяет определить скорость сушки зерна заданной влажности, подогретого до заданной температуры.

Для процесса сушки важной характеристикой являются тепловые характеристики слоя зерна. Теплообмен газа со слоем рассчитывался с учетом отставания прогрева внутренних областей зерен от их поверхности, а также неполной отдачи теплоты от газа к частицам. Неравномерность прогрева зерен нужно учитывать, если число

$$Bi = Nu \frac{\lambda_a}{\lambda_p} \leq 0.1.$$

Для сушки зерна [7] $Nu=0.043Re$, а числа Био имеют значения порядка единицы. Если представить, что зерно имеет форму цилиндра, то при числах Фурье ≥ 0.25 средняя безразмерная температура зерен изменяется со временем по закону

$$\tilde{\theta} = \frac{4Bi^2}{\mu_1^2(\mu_1^2 + Bi^2)} \cdot \exp(-\mu_1^2 Fo),$$

а безразмерная температура поверхности зерна имеет зависимость

$$\theta_s = \frac{2J_1(\mu_1)J_0(\mu_1)}{\mu_1(J_0^2(\mu_1) + J_1^2(\mu_1))} \cdot \exp(-\mu_1^2 Fo). \quad (5)$$

Соответственно, отношение безразмерных средней и поверхностной температур зерна не зависит от времени, а является функцией числа Био,

$$\frac{\tilde{\theta}}{\theta_s} = \frac{2Bi}{\mu_1^2}, \quad \mu_1 = \mu_1(Bi),$$

где

$$\tilde{\theta} = \frac{\bar{t}_p - t_a}{t_{p0} - t_a}, \quad \theta_s = \frac{t_{ps} - t_a}{t_{p0} - t_a}.$$

Аналогично для сферической частицы

$$\frac{\tilde{\theta}}{\theta_s} = \frac{3Bi}{\mu_1^2}.$$

Отношение температуры поверхности и средней температуры цилиндрической частицы с точностью 5 % аппроксимируется линейной зависимостью от числа Био

$$k = \frac{\tilde{\theta}}{\theta_s} = 1 + 0.3426 \cdot Bi. \quad (6)$$

Для сферической частицы аппроксимация имеет

$$\text{вид } k = \frac{\tilde{\theta}}{\theta_s} = 1 + 0.23 \cdot Bi.$$

Рассмотрим баланс теплоты при прохождении потока газа через слой зерна, перемещающийся перпендикулярно потоку газа (рис. 1).

Зерно движется сверху вниз с расходом G_c , воздух продувается сквозь слой толщиной b через боковую поверхность высотой h и длиной L . При определенных предположениях задачу о теплообмене газа со слоем зерна можно разделить на две. Первая задача об изменении температуры газа, проходящего через слой в поперечном направлении, и вторая об изменении температуры зерна в вертикальном направлении. Примем упрощающие первую задачу предположения. В поперечном направлении существует идеальное перемешивание зерна так, что температура его в поперечном направлении постоянна в каждом сечении по высоте слоя. Поскольку в такой постановке температура слоя изменяется только по высоте, можно выбрать для рассмотрения достаточно малый по высоте объем слоя, в котором температура практически постоянна. Уравнение баланса теплоты для воздуха при рассмотрении первой задачи имеет вид $dQ_a = -dQ_k$, где $dQ_a = vol \rho_a c_{pa} (1 - Tu) dt_a$ — изменение энтальпии элемента воздуха с объемом vol при прохождении через слой в течение времени dt . Конвективный поток тепла от газа к частицам можно записать как

$dQ_k = q_p S_p dt$,
где $S_p = \frac{6Tu \cdot vol}{d_e}$ — площадь поверхности частиц диаметром d_e в объеме vol .

$$dQ_k = vol \frac{6Tu Nu (t_a - t_{ps}) \lambda_c}{d_e^2} dt. \quad (7)$$

Перейдем от зависимости по времени к зависимости по поперечной координате в соотношении (7), учитывая, что

$$dt = \frac{(1 - Tu) \rho_a dx}{\rho_{a0} v_{a0}}.$$

Проинтегрировав уравнение баланса теплоты, мы получим отношение разности температур между температурой воздуха на выходе из слоя и температурой поверхности зерен к разности температур воздуха на входе в слой и температурой поверхности зерен

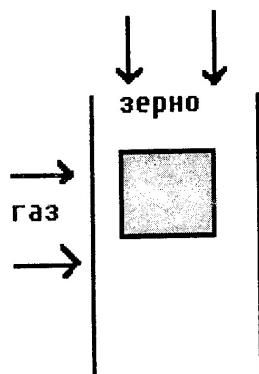


Рис. 1. Схема движения газа и зернистого материала.

$$k_2 = \frac{t_{a2} - t_{ps}}{t_{a0} - t_{ps}} = \exp \left(- \frac{6Tu Nu \lambda_c}{d_e^2 \cdot \rho_{a0} \cdot v_{a0} \cdot c_{pa}} \cdot b \right). \quad (8)$$

Соответственно для второй задачи уравнение прогрева элемента слоя зерна при прохождении от вертикальной координаты от y до $y+dy$ за время dt имеет вид

$$c_{p1} (t_{a0} - t_{a2}) dG_a = -G_c H dw + G_c c_{pp} dt_p.$$

Используя полученные ранее соотношения, это уравнение можно преобразовать к виду

$$\frac{d^2 T_p}{dy^2} + a_1 \exp(-b_1 \tau) + a_2 \exp(-b_2 \tau) + c T_p = 0, \quad (9)$$

где: $T_p = \frac{t_p - t_{a0}}{t_{p0} - t_{a0}}$ — безразмерная температура зерна

данном сечении слоя,

$$a_1 = \frac{H \cdot N \cdot (W_0 - W_L)}{c_{pp}}, \quad b_1 = N,$$

$$a_2 = \frac{H \cdot W_L \cdot (N + 1/\tau_e)}{c_{pp}}, \quad b_2 = (N + 1/\tau_e),$$

$$c = \frac{G_a \cdot c_{pa} \cdot k(1 - k_2)}{c_{pp} \cdot S_b \cdot \rho_p \cdot Tu \cdot b}.$$

В случае, если Tu и b значительно изменяются по высоте слоя, уравнение (9) интегрировалось численно с учетом изменения по высоте слоя этих параметров. Если объемная концентрация материала слоя и толщина слоя постоянны по высоте или их изменение незначительно так, что можно задать средние величины, то уравнение (9) интегрируется

$$T_p = \frac{1}{(b_2 - c)(c - b_1)} \{ \exp(-b_1 \tau) \cdot [-a_2(b_1 - c) \exp(b_1 \tau) - \exp((b_1 + b_2 - c)\tau)] - [-b_2 - c \exp((b_2 - c)\tau) \cdot [a_1(-\exp(b_1 \tau) + \exp(c\tau)) + (b_1 - c) \exp(b_1 \tau)]] \}.$$

Полученные зависимости можно использовать для расчета прогрева и сушки зерна, как в сушилке шахтного типа, так и в вихревых сушилках с продвигаемым слоем. При нагреве зерна пшеницы важно не допустить перегрева зерна. Критические значения температуры нагрева зерна зависят от параметров нагревающего газа и зерна [4]

$$t_{cr} = 180 \cdot \frac{(v_{a0} \cdot \rho_a)^{0.13}}{\sqrt{w_0} \cdot t_a^{0.4}}. \quad (10)$$

Удержание гранулированного полидисперсного материала в конической вихревой камере с псевдооживленным слоем частиц

Вихревая камера с проточным слоем зернистого материала имеет ряд преимуществ по сравнению с устройствами, использующими псевдооживленный слой в поле сил тяжести из-за более высоких скоростей обтекания частиц газом и соответственно более

интенсивных скоростей тепло и массообмена газа и частиц. К недостаткам вихревых теплообменных аппаратов можно отнести небольшую массу удерживаемого слоя зернистого материала в камере, что при высоких производительностях камеры приводит к малым временам контакта зерна с газовым потоком. Общая схема вихревого аппарата показана на рисунке 2. Зерно, подаваемое через загрузочное устройство 1, разгоняется газовым потоком и подается на щелевые аппараты 2 в цилиндрическую и затем в коническую части камеры. Часть частиц, у которых скорость витания в поле центробежных сил меньше скорости обдува потоком газа, подаваемого через щелевые завихрители, уносится вместе с отходящими газами вверх, более крупная фракция частиц по мере подачи зерна уходит в бункер 4. Основываясь на законах сохранения потока импульса можно смоделировать процесс удержания слоя. Интегральное уравнение баланса потока момента импульса для слоя зерна при условии постоянной угловой скорости вращения слоя по высоте камеры можно записать в виде

$$G_z u_{p0} - G_c R_1^2 \Omega + G(V_{\phi 0} - V_{\phi}) R_s = M. \quad (11)$$

В уравнении (11) первые два члена левой части уравнения отвечают за поток момента импульса в слой с подаваемым дисперсным материалом и уходящий поток момента импульса с закрученным материалом на выходе камеры. Третий член левой части уравнения соответствует подводимому к слою потоку момента импульса за счет торможения газового потока с расходом G от тангенциальной скорости $V_{\phi 0}$ на входе в слой до скорости на выходе из слоя V_{ϕ} , со средним радиусом щелевого аппарата R_s . Правая часть уравнения (11) представляет собой потери момента количества движения слоя за счет трения о стенки камеры. В большинстве случаев первые два члена уравнения (11) можно не учитывать, поскольку каждый из них на порядок меньше подводимого с потоком газа потока момента количества движения, а их разность еще меньше. Для моделирования потока момента количества движения от слоя к стенкам камеры за счет трения нами использовались две модели трения слоя о стенки камеры.

Поток момента количества движения за счет трения о стенки определялся как интеграл по площади боковой поверхности вихревой камеры S .

$$M = \int \tau r ds \quad (12)$$

В первой модели трение о стенку моделировалось с помощью эффективной вязкости псевдоожиданного слоя Джонсона [7]

$$\mu_t = \mu \frac{1 + 0.5(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^4} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^9,$$

где $\tau = \mu_t \frac{\Omega r}{d_e}$, $d_s = 2\pi r d l$. Для этой модели из (11) и (12) следует

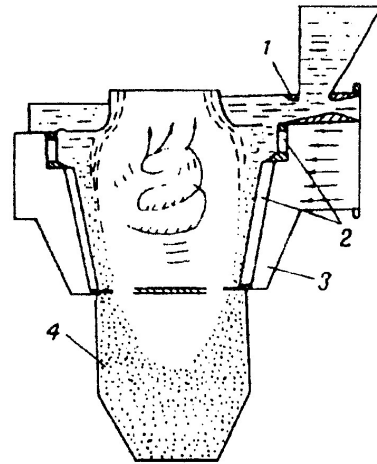


Рис. 2. Вихревая камера для тепло- и массообмена между газовым потоком и зернистым материалом; 1 - загрузочное устройство; 2 - завихрители; 3 - улиткообразный корпус; 4 - бункер.

$$\Omega = \frac{2G \cdot (V_{\phi 0} - V_{\phi 0}) R_s d_e \sin \alpha}{\pi \mu_t (R_2^4 - R_0^4)}. \quad (13)$$

Во второй модели предполагалось, что слой не является полностью ожиженным и трение о стенку происходит аналогично трению двух тел, при наличии силы, нормальной к поверхности трения. В приближении тонкого слоя зернистого материала $\tau = \rho_p Tu \cdot b \cdot \beta (\Omega^2 r \cdot \cos \alpha + g \cdot \sin \alpha - D)$.

$$D = \frac{\Delta P}{\rho_c \psi} = \frac{3\rho Tu}{2\rho_c \psi} \left(1 + \frac{422}{Re_m} \right) \frac{V_n^2}{d_{eff}} \quad (14)$$

[5], где $\psi = 0.508 - 0.56 Tu$, [5]. Число Рейнольдса $Re_m = \frac{\rho V d_{eff}}{\mu}$ построено по полной скорости на выходе из щели V и эффективному диаметру частиц в слое d_{eff} .

В качестве первого приближения, [7] объемная концентрация для пшеницы может быть принята равной $Tu = 0.623$, однако затем в процессе расчета может быть учтено влияние динамических условий на объемную концентрацию в слое. В частности, можно воспользоваться зависимостью из работы [6]

$$\varepsilon = \left(\frac{18Re + 0.36Re^2}{Ar} \right)^{0.21} \quad (15)$$

Толщина слоя b может быть определена из условия равновесия сил, касательных к свободной поверхности слоя

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{dr}{dx} = - \frac{g}{\Omega^2 r}. \quad (16)$$

Интегрируя это уравнение, получаем форму свободной поверхности слоя, представляющую собой параболоид вращения

$$r^2 = R_1^2 - \frac{2g(x - x_L)}{\Omega^2} \quad (17)$$

Соответственно толщина слоя в радиальном сечении

$$b = R_0 + (x_L - x) \operatorname{tg} \alpha - \sqrt{R_1^2 + \frac{2g(x_L - x)}{\Omega^2}} \quad (18)$$

В расчетах будем использовать среднюю толщину слоя, определяемую как отношение объема слоя к площади боковой поверхности вихревой камеры

$$b = \frac{\operatorname{vol}}{S} \quad (19)$$

В случае, когда масса слоя m_c задана,

$$\operatorname{vol} = \frac{m_c}{\rho_p Tu},$$

и из (11), (12) для второй модели имеем

$$\Omega^2 = \frac{G(V_{\varphi 0} - V_{\varphi}) R_2 S}{0.5 \pi m_c \beta \cos \alpha (R_2^4 - R_0^4) / \sin \alpha} - \frac{[2 \pi m_c g \beta (R_2^3 - R_0^3) (1 - D / (g \sin \alpha)) / 3] \cdot \frac{1}{\cos \alpha}}{0.5 \pi m_c \beta \cos \alpha (R_2^4 - R_0^4) / \sin \alpha} \quad (20)$$

В случае, когда масса слоя неизвестна, объем слоя определяется как разность объема усеченного конуса вихревой камеры и параболоида вращения, задаваемого формулой (17)

$$\operatorname{vol} = \pi x_L [R_0^2 - R_1^2 + x_L \operatorname{tg} \alpha (R_0 + x_L \operatorname{tg} \alpha / 3) - x_L g / \Omega^2] \quad (21)$$

а толщина слоя по формуле (19). Кроме этого, из формулы (21) может быть определен радиус контакта слоя с диафрагмой в нижней части камеры R_1 , поскольку этот радиус может быть больше радиуса выходной диафрагмы.

Соответственно для второй модели с неизвестной массой слоя при протекании материала через камеру уравнение (11) сводится к виду

$$a_4 \Omega^4 + a_2 \Omega^2 + a_0 = 0 \quad (22)$$

или

$$\Omega = \sqrt{\frac{-a_2 + \sqrt{a_2^2 - 4a_0 a_4}}{2a_4}}, \quad (23)$$

где

$$a_0 = -2 \pi c_2 \beta \rho_p Tu \cdot (g \cdot \sin \alpha - D) (R_2^3 - R_0^3) / (3 \sin \alpha),$$

$$a_2 = 2 \pi c_1 \beta \rho_p Tu \cdot (g \cdot \sin \alpha - D) (R_2^3 - R_0^3) / (3 \sin \alpha) -$$

$$- 0.5 \pi c_2 \beta \rho_p Tu \cdot \cos \alpha (R_2^4 - R_0^4) / \sin \alpha -$$

$$- 0.5 (R_0 + R_2) G (V_{\varphi 0} - V_{\varphi});$$

$$a_4 = 0.5 \pi c_1 \beta \rho_p Tu \cdot \cos \alpha (R_2^4 - R_0^4) / \sin \alpha,$$

а коэффициенты c_1 и c_2 определялись при определении средней толщины слоя из (19) и (21)

$$b = c_1 - c_2 / \Omega^2,$$

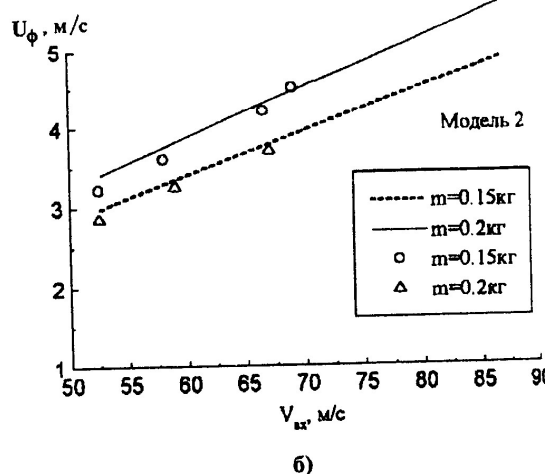
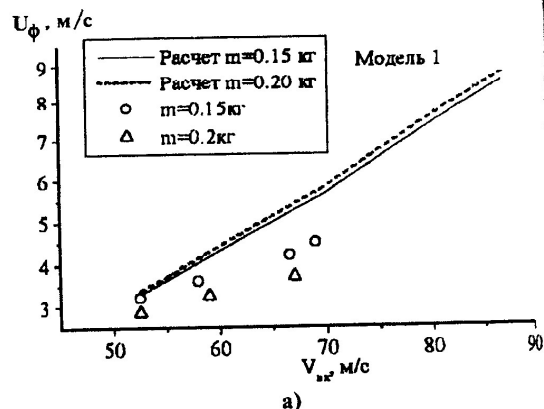


Рис. 3. Влияние скорости газового потока при выходе из щелей на скорость вращения зерен пшеницы в центрифужной камере при заданной массе зерна.

где $c_1 = \pi x_L [R_0^2 - R_1^2 + x_L \operatorname{tg} \alpha (R_0 + (x_L \operatorname{tg} \alpha) / 3)] / S$
 $c_2 = \pi x_L^2 g / S$.

Для определения тангенциальной скорости в той фазе после прохождения слоя нами использовалась зависимость аналогичная (14) применительно к затуханию тангенциальной скорости относительно вращающегося слоя

$$\frac{\rho (\Delta V_{\varphi 0}^2 - \Delta V_{\varphi}^2)}{2} = \frac{3 \rho Tu}{2 \varepsilon \psi} \left(1 + \frac{422}{\operatorname{Re}_m} \right) \frac{\Delta V_{\varphi}^2 b}{d_{\text{eff}}}$$

или

$$\Delta V_{\varphi}^2 = \frac{\Delta V_{\varphi 0}^2}{\left(1 + \frac{3 Tu}{\varepsilon \psi} \left(1 + \frac{422}{\operatorname{Re}_m} \right) \frac{b}{d_{\text{eff}}} \right)} \quad (24)$$

Таким образом, получены все соотношения для расчета параметров слоя в вихревой камере.

На рисунках 3а, б и 4 показано влияние скорости газа в щели и массы слоя на скорость вращения слоя зерна в цилиндрической камере диаметром 0,2 м и высотой щелевого аппарата 0,036 м с отношением площади щелей к площади боковой поверхности 0,0322. Геометрия камеры и экспериментальные данные приведены в работе [8]. Видно, что влияние скорости газа в щели, также как и влияние массы вращающегося слоя, лучше описывается второй моделью. Для указанной камеры порозность слоя, определяемая по формуле (15) и средней по слою радиальной скорости газа, соответствует порозности плотного слоя пшеницы, [7] $\epsilon=0.377$, хотя порозность по радиальной скорости на выходе из каждой щели составляет величину $\epsilon=0.74$ при скорости входного потока из щели 53 м/сек. Учет аэродинамического сопротивления слоя при расчете угловой скорости вращения слоя по формуле (20) дает для рассматриваемой камеры увеличение скорости вращения на 6 %. Это указывает на то, что в целом слой еще далек от псевдоожижения за счет аэродинамического взаимодействия слоя и потока газа, хотя определенный вклад может вносить аэродинамическое псевдоожижение вблизи щелей, также как и механическое псевдоожижение за счет отскока частиц вращающегося слоя при столкновениях со стенкой. Следует отметить, что роль сопротивления слоя при увеличении размеров камеры и сохранении значения тангенциальной скорости на выходе из щели должна возрастать, поскольку центробежные силы, действующие на слой, при увеличении радиуса вращения снижаются.

Следует отметить, что с уменьшением скорости вращения слоя уменьшается и толщина слоя в верхней части камеры. Поэтому для большей равномерности толщины слоя желательно делать камеру с сужением к низу. На рис. 5 показано изменение толщины слоя к низу цилиндрической камеры, описанной ранее, с массой слоя 0,15 кг и тангенциальной

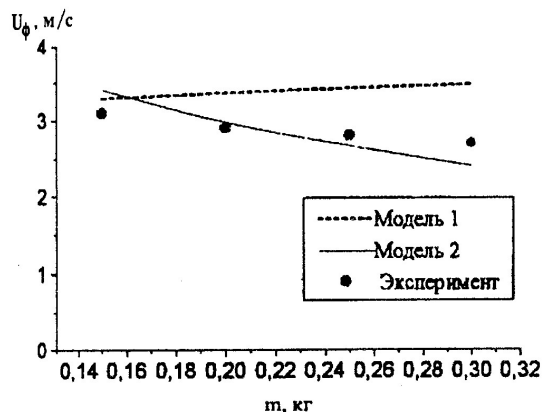


Рис. 4. Влияние массы слоя зерен пшеницы в цилиндрической камере при заданной скорости газа в щели 52,5 м/с на скорость вращения слоя.

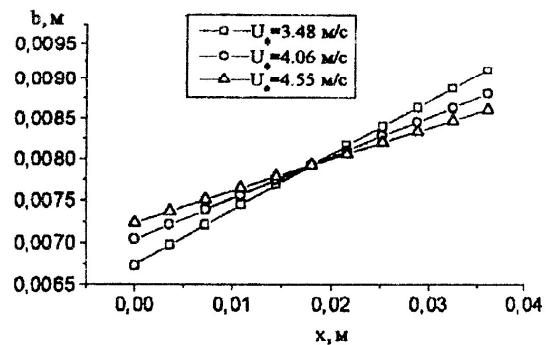


Рис. 5. Влияние скорости вращения слоя зерна на изменение толщины слоя к низу камеры.

скоростью газового потока на выходе из щели от 52,6 до 69,6 м/сек. Таким образом, предложенные модели позволяют рассчитать толщину слоя, а также динамические параметры, необходимые для расчета теплообмена газового потока с дисперсным материалом.

3. Результаты расчета сушки зерна пшеницы в шахтной сушилке с вихревыми аппаратами и без них

Метод расчета сушки пшеницы был отгестирован на работающих аппаратах – вихревой камере ИТФ производительностью 15 т/ч и 30 т/ч для очистки зерна от примесей и подогрева перед подачей в шахтную сушилку и промышленной сушилке шахтного типа производительностью 30 т/ч. Экспериментальные данные получены А.Н. Кайдаником и А.Н. Ядыкиным. Результаты представлены ниже.

Вихревая камера ИТФ: Расход зерна 14,99 т/ч, расход горячего воздуха 13,8 т/ч, температура воздуха на входе 206 °С, влажность зерна на входе 19 %, температура зерна на входе 11 °С.

Шахтная сушилка с установленной перед сушилкой вихревой камерой. Расход зерна 30 т/ч, расход горячего воздуха в сушилку 102 т/ч, температура воздуха на входе в сушилку 130 °С, температура зерна перед обработкой в вихревой камере 11 °С, расход горячего воздуха в вихревую камеру 22,5 т/ч, температура воздуха на входе в вихревую камеру 206 °С, влажность зерна на входе 25 %.

Из приведенных в таблице 1 и 2 данных видно, что модель расчета дает близкие к эксперименту результаты по глубине сушки и температуре зерна на выходе из аппарата. При предварительном подогреве

Табл. 1.

Параметры на выходе	Расчет	Эксперимент
Влажность, %	18,8	18,7
Температура зерна	45,8	45
Допустимая температура	62,2	

Табл. 2.

Параметры на выходе	Температура зерна на входе в сушилку 11°C	Температура зерна на входе в сушилку 45 °C (предварительно подогревается в вихревой камере)
Влажность, %	15.85	13.65
Температура зерна	48.4	46.05
Допустимая температура зерна	47.4	47.4
Удельный расход теплоты на сьем 1 % влаги	52.8 кДж/кг	52.16 кДж/кг

зерна в вихревом аппарате глубина сушки возрастает, а удельные энергозатраты снижаются. Кроме того, следует учитывать, что вихревой аппарат производит также очистку зерна от легких примесей засоряющих зерно, что приводит к улучшению качества зерна.

Отдельные этапы работы выполнены при поддержке грантов Миннауки по проекту "Высокотемпературные течения и теплообмен в элементах энергетических установок" и РФФИ N96-01-10010.

Литература

1. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. – 471 с.
2. Жидко В.И., Кутаров В.В. Обобщенное уравнение кинетики сушки для различных материалов. Материалы всесоюзной научно-технической конференции по интенсификации процессов сушки и использованию новой техники. секция 1 (теория сушки). – Минск. – 1977. – С. 95-99.
3. Алейников В.И., Жидко В.И., Спиридонова М.Г. Эффективность предварительного нагрева зерна перед сушкой. ВНИИЗ. – Труды 1970. – вып. 70. – С. 136-147.
4. Каткова О.Н. Исследование изменения качества зерна в процессе сушки. ВНИИЗ. Труды 1970. – вып. 70. – С. 115-125.
5. Гольдштейн М.А. Процессы переноса в зернистом слое. – Новосибирск, 1984. – 164 с.
6. Горошко В.Д., Розенбаум Р.Б., Тодес О.М. Изв. Вузов. – Нефть и газ. – № 1. – 125 (1958).
7. Зуев Ф.Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях. – М.: Колос, 1976. – 344 с.
8. Волчков Э.П., Кайданик А.Н., Ядыкин А.Н. Влияние вращающегося слоя зернистого материала на параметры газового потока в вихревой камере сгорания. Сибирский физико-технический журнал. – Вып. 5. – 1991. – С. 102-105.
9. Справочник по теплообменникам/ Пер. с англ. под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат. – 1987. – Т. 2. – 560 с.

Получено 22.02.99г.

YANG W-J¹, REZNICEK R.², MOCHIZUKI S.³

¹ University of Michigan, U.S.A.

² University of Agriculture Prague, The Czech Republic

³ Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan

TRANSFER RESISTANCES IN CROP DRYING AND COOLING

Запропоновано метод аналізу ролі опору тепло- і вологообміну у сушінні і охолодженні зернових. Наведено два методи аналізу теплообміну, які дійсні як для сушіння, так і для охолодження зернових, якщо швидкості фазового обміну не є дуже низькими. Результати придатні для усіх видів зернових.

Предложен метод анализа роли сопротивления тепло- и влагообмену при сушке и охлаждении зерновых. Представлены два метода анализа теплообмена, действительных как для сушки, так и для охлаждения зерновых, если скорости фазового обмена не являются очень низкими. Результаты применимы для всех видов зерновых.

A method is introduced to analyze the roles of heat and moisture transfer resistances in the drying and cooling of crops. In most grain bed and packed bed situations, all transfer resistances are comparable in magnitude. Two methods of heat transfer analysis are presented which are valid for both drying and cooling of crops in the absence of very low rates of phase change. Results can be applied to all crops including leafy, large, spherical, and long cylindrical products.