

УДК 66.047

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ БАРАБАННОЙ СУШИЛКИ

© 2025 г. А. Б. Голованчиков, Н. А. Меренцов, Н. А. Прохоренко,
А. А. Шурак, М. В. Топилин*

ФГБОУ ВО “Волгоградский государственный технический университет”, Волгоград, Россия

*e-mail: topilintik@gmail.com

Поступила в редакцию 22.08.2024

После доработки 30.04.2025

Принята в печать 04.05.2024

На основании дифференциальных уравнений материального баланса и массопередачи для высушиваемого материала и сушильного агента выведены уравнения рабочей и равновесной линии при противоточном движении фаз в барабанной сушилке. Предложен алгоритм расчета и проведено сравнение технологических параметров процесса сушки с учетом продольной диффузии с аналогичными параметрами, рассчитанными по типовому алгоритму. Приведены графики полученных результатов в косоугольной диаграмме Рамзина и прямоугольных координатах Эйлера. Показано, что с учетом числа Пекле продольной диффузии, то есть перехода от режима вытеснения к режиму продольного смешения, рассчитанные длину и объем барабана необходимо увеличивать в 1.1 и более раз при $Pe < 30$.

Ключевые слова: сушка, продольная диффузия, число Пекле продольной диффузии, градиент влагосодержания сушильного агента – воздуха, влажность высушиваемых частиц, влагосодержание воздуха, длина и объем барабана

DOI: 10.31857/S0040357125020064 EDN: ndevca

ВВЕДЕНИЕ

Тепломассообменные процессы и аппараты сушки материалов находят широкое применение в различных отраслях промышленности: химической, нефтехимической, строительной, пищевой и смежных отраслях [1–4]. Активно продолжается работа исследователей в области совершенствования сушильного оборудования и математического моделирования протекающих гидродинамических и тепломассообменных процессов [5–11].

С середины прошлого века, сначала при расчете химических процессов в реакторах, а затем и при расчетах массообменных и тепловых процессов в аппаратах и теплообменниках, ведется учет структуры потоков. Расчет часто проводится с помощью ячееккой модели с переходом от идеального смешения (при числе ячеек $N = 1$) к идеальному вытеснению (при $N \rightarrow \infty$) [12, 13].

Дискретность параметров этой модели со скачками концентраций при переходе от одной ячейки к другой, но с идеальным смешением в каждой наглядно демонстрируется при расчете

числа теоретических тарелок в абсорбционных, ректификационных колоннах и других массообменных аппаратах, когда на каждой ступени происходит локальный скачок от рабочих к равновесной концентрации по каждой фазе [14–17].

Для более точного описания реальной структуры потоков с семидесятых годов прошлого столетия и по настоящее время стали применять комбинированные модели структуры потоков с последовательным и параллельным соединением зон идеального вытеснения и смешения. Но наиболее точно реальные структуры потоков описывают диффузионной моделью, хотя она математически более сложная, так как опирается на дифференциальные уравнения II порядка со специальными граничными условиями [12, 14, 18–22].

Однако для математического описания процесса сушки эта модель практически не используется из-за отсутствия на косоугольной диаграмме Рамзина концентрации (влажности) высушиваемого материала [23, 24]. Поэтому целесообразно при описании процесса сушки по-

лученные параметры результатов расчетов представить в традиционной для массообменных процессов прямоугольной координатной системе Эйлера (помимо J -х диаграммы).

Целью работы является оценка влияния продольной диффузии на технологические параметры процесса сушки и геометрические размеры барабанной сушилки.

Моделирование процесса сушки в барабанной сушилке с учетом продольной диффузии. Для вывода уравнений рабочей линии процесса сушки в противоточной барабанной сушилке с учетом продольной диффузии составим элементарный материальный баланс по влаге в высушиваемом материале и водяному пару в сушильном агенте – воздухе. Схема барабанной сушилки с материальными потоками и их параметрами представлена на рис. 1, а обозначения приведены в табл. 1.

Составим элементарный материальный баланс по расходу воды ω в высушиваемом материале G и водяного пара в сушильном ω агенте – воздухе L для выделенного объема барабана длиной dz между сечениями I-I и II-II:

$$L\Delta x + V_D \frac{\pi d_a^2}{4} + G\omega = L\left(x + \frac{dx}{dh} dh\right) + \\ + G\left(\omega - \frac{d\omega}{dh} dh\right) + \frac{\pi d_a^2}{4} \left(V_D + \frac{dV_D}{dh} dh\right),$$

где G – производительность по абсолютно сухим частицам высушиваемого материала, кг/с.

После алгебраических преобразований получаем:

$$L \frac{dx}{dh} + \frac{\pi d_a^2}{\rho} \frac{dV_D}{dh} - G \frac{d\omega}{dh} = 0. \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение (1) учитывает продольную диффузию водяных паров, где:

$$V_D = -(D_l\rho) \frac{dx}{dh}. \quad (2)$$

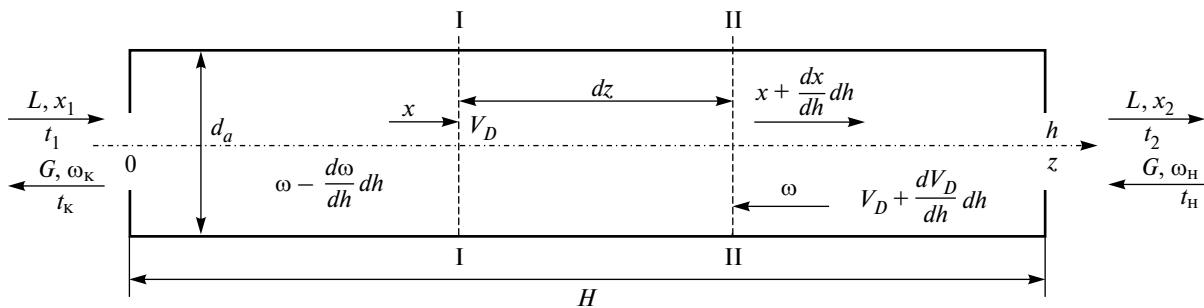


Рис. 1. Схема барабанной сушилки с материальными потоками и их параметрами с учетом скорости продольной диффузии V_D .

Уравнение (2) является аналогом закона молекулярной диффузии Фика:

$$V_M = -D \frac{dx}{dh},$$

в котором D – коэффициент молекулярной диффузии (изотропный по всем направлениям, в котором есть градиенты концентраций).

Здесь плотность ρ сушильного агента учитывает размерности левой [$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$] и правой частей уравнения (2).

Дифференциальное уравнение (1) с учетом (2) принимает вид:

$$L \frac{dx}{dh} - \frac{\pi d_a^2}{4} D_l \rho \frac{d^2 x}{dh^2} - G \frac{d\omega}{dh} = 0. \quad (3)$$

В отсутствие продольной диффузии при движении потока сушильного агента L в режиме идеального вытеснения дифференциальное уравнение материального баланса (3) после разделения переменных и интегрирования с учетом граничных условий при $z = 0$; $\omega = \omega_k$ приобретает известный вид [8]:

$$L(x - x_1) = G(\omega - \omega_k).$$

Так как при $x = x_2$, $\omega = \omega_h$, то из интегрально-материального баланса находится расход сушильного агента:

$$L = \frac{G_h (\omega_h - \omega_k)}{(x_2 - x_1)(1 - \omega_k)}.$$

С учетом продольной диффузии уравнение (3) запишется в виде:

$$G \frac{d\omega}{dh} = L \frac{dx}{dh} - \frac{\pi d_a^2}{4} D_l \rho \frac{dg}{dh},$$

или при переходе к безразмерной длине:

$$z = \frac{h}{H}, dz = \frac{dh}{H},$$

после алгебраических преобразований с учетом того, что число Пекле продольной диффузии:

$$Pe = \frac{v_a H}{D_l},$$

получаем дифференциальное уравнение рабочей линии процесса сушки с учетом продольной диффузии:

$$\left(\frac{G}{L}\right) \frac{d\omega}{dz} = g - \frac{1}{Pe} \frac{dg}{dz}. \quad (4)$$

Из элементарного баланса по паровой фазе, приходящей в сушильный агент в секунду в выделенном объеме:

$$dW = Ldx,$$

и дифференциального уравнения массопередачи:

$$dW = k_V \left(\frac{\pi d_a^2}{4} dz \right) (x^* - x),$$

приравнивая правые части последних двух уравнений, получаем:

$$\frac{dx}{(x^* - x)} = k_V \left(\frac{\pi d_a^2}{4} \right) \left(\frac{dz}{G} \right),$$

где k_V – объемный коэффициент массопередачи по влаге из высушиваемого материала в сушильный агент,

$$\left[\frac{\text{кг}W}{c \text{ м}^3 \left(\frac{\text{кг}W}{\text{кг}G} \right)} \right].$$

После интегрирования приходим к формуле для расчета длины барабана:

$$H^* = \text{ЧЕП}_x^* \frac{G}{k_V \left(\frac{\pi d_a^2}{4} \right)}, \quad (5)$$

где ЧЕП_x^* – число единиц переноса.

Вывод дифференциального уравнения массопередачи с учетом продольной диффузии. Алгоритм расчета длины барабана через рекомендуемую величину напряженности барабана по влаге известен [17, 23] для сушильного агента, движущегося в режиме идеального вытеснения.

Определение коэффициента массопередачи в процессе барабанной сушки. Обычно в справочниках и учебной литературе задаются диапазоны возможных значений напряженности барабана по влаге с размерностью:

$$A_V = \frac{\text{кг}W}{V_6 \text{ час}},$$

где V_6 (м³) – объем барабана с физическим смыслом: масса влаги, удаляемой из высушиваемого материала, в единице объема барабана в час.

Зная напряженность барабана по влаге A , расчет фиктивного объемного коэффициента массопередачи можно проводить по формуле:

$$k_V^I = \frac{A_V}{\Delta x_{cp}}, \quad (6)$$

где

$$\Delta x_{cp} = \frac{x_2 - x_1}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x^* - x}}, \quad (7)$$

Δx_{cp} – средняя движущая сила массопередачи по сушильному агенту (воздуху); x_1 и x_2 – начальное и конечное влагосодержание воздуха, а выражение, стоящее в знаменателе, характеризует число единиц переноса ЧЕП.

Физический смысл объемного фиктивного коэффициента массопередачи вытекает из его размерности (отнесенного к объему барабана):

$$k_V^I = \left[\frac{\text{кг}W}{c \text{ м}^3 \left(\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L} \right)} \right],$$

где L – сушильный агент (воздух), а м^3 – объем барабана, а в уравнении (5) м^3 высушиваемых частиц, создающих поверхность массопередачи. Тогда объемный истинный коэффициент массопередачи k_V и объемный фиктивный коэффициент массопередачи k_V^I связаны между собой коэффициентом заполнения барабана e высушиваемым материалом:

$$k_V = \frac{k_V^I}{e}.$$

Тогда выражение (6) для истинного коэффициента массопередачи приобретает вид:

$$k_V = \frac{A_V}{\Delta x_{cp} e}. \quad (8)$$

Выведем дифференциальное уравнение массопередачи для выделенного объема dV барабана между сечениями I-I и II-II с учетом продольной диффузии (рис. 2):

$$Lx + V_D \frac{\pi d_a^2}{4} + k_V e \frac{\pi d_a^2}{4} (x^* - x) dz = \\ = L \left(x + \frac{dx}{dz} dz \right) + \frac{\pi d_a^2}{4} \left(V_D + \frac{dV_D}{dz} dz \right),$$

(здесь слева – приход влаги, а справа – расход влаги), или после алгебраических преобразований с учетом (2):

$$ek_V \left(\frac{\pi d_a^2}{4} \right) (x^* - x) = L \frac{dx}{dh} - \frac{\pi d_a^2}{4} D_l \rho \frac{d^2 x}{dh^2}.$$

Переходя к безразмерной длине, получаем с учетом выше принятых обозначений:

$$x_1 = x_h - \frac{g_h}{Pe},$$

с заданной точностью, например:

$$0.01 \geq abs[(x_h - g_h / Pe) - x_1] / x_1,$$

то есть 1%.

При выполнении этого условия расчеты заканчиваются, а полученное методом половинного деления значение k_f подставляется в уравнение (13) для определения длины барабана с учетом продольной диффузии:

$$H_d = \frac{k_f V_{\text{вр}} \rho}{k_V e}. \quad (14)$$

Известным уравнением:

$$k_f = \frac{6k_V}{d_e}$$

можно связать поверхностный коэффициент массопередачи с объемным и эквивалентным диаметром высушиваемых частиц [25].

Результаты расчетов основных параметров процесса сушки как функций безразмерной длины барабана по типовому алгоритму без учета продольной диффузии приведены в табл. 2, а с учетом продольной диффузии при $Pe = 10$ в табл. 3 [25].

Рабочие линии этих процессов сушки представлены как в традиционной косоугольной диаграмме Рамзина (рис. 3), так и более наглядно со скачками на входе влагосодержания, темпе-

Таблица 1. Исходные и справочные данные и расчетные параметры барабанной сушилки с учетом продольной диффузии (сушка частиц поваренной соли)

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение в алгоритме	Величина
1	2	3	4	5
Исходные данные				
1	Производительность на входе по частицам высушиваемого материала	кг/час	G_h	10000
2	Абсолютная массовая влажность частиц на входе в барабан	кгW/кг G_h	ω_{h1}	0.06
3	Абсолютная массовая влажность частиц на выходе из барабана	кгW/кг G_k	ω_{k1}	0.002
4	Температура воздуха на входе в калорифер (окружающий воздух)	°C	t_0	25
5	Относительная влажность воздуха на входе в калорифер	доли	Φ_0	0.5
6	Рекомендуемая температура воздуха на входе в барабан [23]	°C	t_l	200
7	Рекомендуемая температура воздуха на выходе из барабана	°C	t_2	75
8	Напряженность барабана по влаге	кгW/м³час	A_v	7.2
9	Средний эквивалентный размер частиц высушиваемого материала	м	d_k	0.001
10	Рекомендуемая скорость воздуха в барабане	м/с	v_{lb}	1
11	Плотность частиц высушиваемого материала	кг/м³	ρ_k	2165
12	Теплоемкость сухого воздуха	кДж/кг град	c_{cb}	1.01
13	Теплоемкость водяных паров	кДж/кг град	c_p	1.97
14	Теплоемкость частиц высушиваемого материала	кДж/кг град	c_m	0.74
15	Теплоемкость воды	кДж/кг град	c_w	4.19
16	Энтальпия водяного пара по 0°C	кДж/кг	i_p	2493
17	Доля объема барабана, заполненного частицами высушиваемого материала	—	e	0.25
18	Число Пекле продольной диффузии	—	Pe	10
Расчетные параметры				
1	Производительность по удаляемой влаге из высушиваемых частиц	кгW/час	W	581.2
2	Производительность по высушенным частицам на выходе из барабана	кг G_k /час	G_k	9418.8
3	Относительная влажность материала на входе	кгW H_h /кгG	ω_h	0.06338
4	Относительная влажность на выходе	кгW k /кгG	ω_k	0.002004

Таблица 1. Продолжение

1	2	3	4	5
5	Производительность по абсолютно сухому высушиваемому материалу	$\frac{\text{кг}G}{\text{час}}$	G	9400
6	Давление насыщенных водяных паров для температуры окружающего воздуха t_0	ат	p_0^*	0.0327
7	Влагосодержание воздуха при температуре t_0	$\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}$	x_1	0.00986
8	Энталпия воздуха при температуре t_1	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}L}$	J_1	230.5
9	Энталпийный параметр, учитывающий отклонения действительной сушилки от теоретической	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}W}$	D	-509.8
10	Температура высушиваемого материала на входе	$^{\circ}\text{C}$	t_m	25
11	Влагосодержание сушильного агента воздуха на выходе из барабана	$\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}$	x_2	0.0507
12	Энталпия воздуха на выходе из барабана	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}L}$	J_2	209.6
13	Расход сухого воздуха	$\frac{\text{кг}L}{\text{час}}$	L	14229
14	Средний расход влажного воздуха	$\frac{\text{кг}L_w}{\text{час}}$	L_w	14659.9
15	Средняя температура воздуха в барабане	$^{\circ}\text{C}$	t_{bs}	137.5
16	Средняя плотность воздуха в барабане	$\text{кг}/\text{м}^3$	ρ_b	0.858
17	Объемная производительность (средняя) по воздуху в барабане	$\text{м}^3/\text{с}$	q_v	4.747
18	Диаметр расчетный барабана	м	D_b	2.459
19	Объем барабана	м^3	V_b	80.7
20	Расчетная длина барабана	м	l_b	17.005
21	Относительный расход сухого воздуха, приходящийся на 1 кг сухого материала	$\frac{\text{кг}L}{\text{кг}G}$	L_G	1.42
22	Среднее время пребывания высушиваемых частиц в барабане	час	t_{sk}	4.66
23	В табл. 2 приведены зависимости влажности частиц W_i , влагосодержания воздуха x_{pi} , влагосодержания воздуха при температуре мокрого термометра x_{pi} , температуры воздуха t_i , температуры мокрого термометра t_{mi} , энталпии J_i , парциального давления водяных паров p_i , парциального давления водяных паров p_{pi} при температуре мокрого термометра, относительной влажности воздуха Φ_i , расчетного значения энталпии J_{ri} , (которое уравнивается с энталпийей J_i , с заданной точностью методом половинного деления) от относительной z длины барабана с интервалом $\Delta z = 0.1$	$\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}L}$ ат доля $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}L}$ %	x_{pi} J_i p_i Φ_i J_{ri} δ_i	см. табл. 2 результатов расчета
24	Число единиц переноса для воздуха	=	z	0–1
25	Средняя движущая сила по воздуху	$\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}$	Δx_c	0.0316
26	Объемный коэффициент массопередачи по воздуху	$\frac{\text{кг}W}{\text{м}^3 \text{с} \frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}}$	k_v	0.2535

Таблица 1. Окончание

1	2	3	4	5
27	Поверхностный коэффициент массопередачи по воздуху	$\frac{\text{кг}W}{\text{м}^2\text{с}} \diagup \frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}$	k_f	1.256
28	Движущая сила по воздуху с учетом продольной диффузии	$\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}$	Δx_{dc}	0.0274
29	Число единиц переноса для воздуха с учетом продольной диффузии	—	ЧЕП_d	1.488
30	Объем барабана с учетом продольной диффузии	м^3	V_d	95.6
31	Напряженность барабана по влаге с учетом продольной диффузии	$\frac{\text{кг}W}{\text{м}^3\text{час}}$	A_{vd}	6.08
32	Объемный коэффициент массопередачи по воздуху	$\frac{\text{кг}W}{\text{м}^3\text{с}} \frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}$	k_{vd}	0.254
33	Среднее время пребывания высушиваемых частиц в барабане с учетом продольной диффузии	час	t_{dsk}	5.5
34	Увеличение высоты и объема барабана, рассчитанного с учетом продольной диффузии, по сравнению с барабаном, рассчитанным по типовому алгоритму без учета продольной диффузии	—	o_{vd}	1.18

Результаты расчетов с учетом продольной диффузии при $Pe = 10$

1	<p>В табл. 3 приведены результаты расчетов параметров барабанной сушилки в виде зависимости:</p> <ul style="list-style-type: none"> а) влажность высушиваемых частиц; б) влагосодержание воздуха; в) влагосодержание воздуха при температуре мокрого термометра; г) температура воздуха; д) температура мокрого термометра; е) энталпия воздуха; ж) парциальное давление водяных паров в воздухе; з) парциальное давление водяных паров при температуре мокрого термометра; и) относительная влажность воздуха; к) градиент влагосодержания воздуха по безразмерной длине барабана от безразмерной длины барабана z (которая изменяется от 1 до нуля при шаге $\Delta z = 0.1$). 	$\frac{\text{кг}W}{\text{кг}G}$	ω_i	см. табл. 3 результатов расчета
		$\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}$	x_i	
		$\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}$	x_{pi}	
		$^{\circ}\text{C}$	t_i	
		$^{\circ}\text{C}$	t_{mi}	
		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}L}$	J_i	
		ат	p_i	
		ат	p_{pi}	
		доля	Φ_i	
		$\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}$	g_i	
		—	z	0–1
2	Влагосодержание воздуха на входе в барабан с учетом его скачка за счет продольной диффузии	$\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}$	x_h	0.0167
3	Градиент влагосодержания воздуха на входе по безразмерной длине барабана z	$\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}$	g_h	0.0687
4	Расчетное влагосодержание воздуха перед входом барабана с учетом продольной диффузии	$\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}$	x_{rl}	0.0098
5	Заданное влагосодержание воздуха перед входом в барабан (x_{rl} уравнивается с x_1 методом половинного деления и с заданной относительной ошибкой, не превышающей 1%)	$\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}$	x_1	0.0098
6	Коэффициент продольной диффузии	$\text{м}^2/\text{с}$	D_l	0.344
7	Диаметр барабана с учетом продольной диффузии	м	D_b	2.014
8	Длина барабана с учетом продольной диффузии	м	l_d	20.1

ратуры и энталпии сушильного агента в прямоугольных координатах Эйлера (рис. 4). Показано, что при расчете числа Пекле продольной диффузии, то есть при переходе от режима вытеснения к режиму продольного смешения, рассчитанные длину и объем барабана необходимо увеличивать в 1.2 и более раз, результаты показаны на рис. 5 [25].

Также на рис. 5 представлены графики рабочих и равновесных линий типового процесса

сушки без учета продольной диффузии и с ее учетом также при $Re = 10$, как видно из графиков, рабочая линия продольной диффузии (2) за счет скачка влагосодержания на входе от x_1 до x_n и ее выпуклости (она в отличие от рабочей линии (1) для типового процесса сушки не является прямой) в сторону равновесия уменьшает локальные и среднюю движущую силу процесса массопередачи, что приводит к необходимости увеличения длины и объема барабанной сушилки.

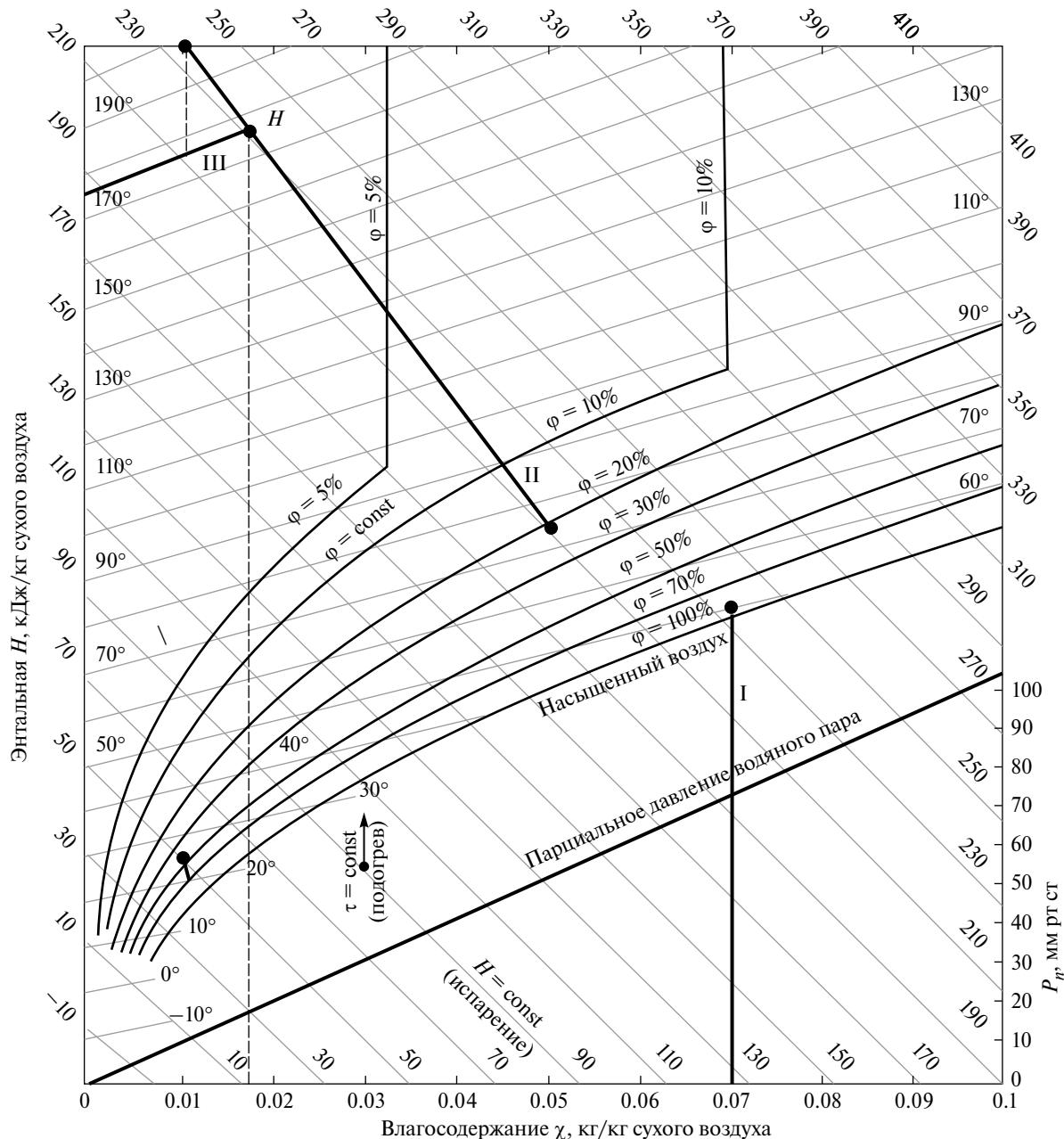


Рис. 3. Рабочие линии процесса сушки на J - x диаграмме Рамзина: I-II – действительная сушка при типовом расчете без учета продольной диффузии; I-III-H – пунктирная ломанная линия характеризует изменения влагосодержания с x_1 до x_n , температуры с t_1 до t_n и энталпии с J_1 до J_n (см. ниже строчки табл. 3 и значения этих параметров в табл. 1) при расчетах с учетом продольной диффузии при $Re = 10$; H-II – рабочая линия с учетом продольной диффузии.

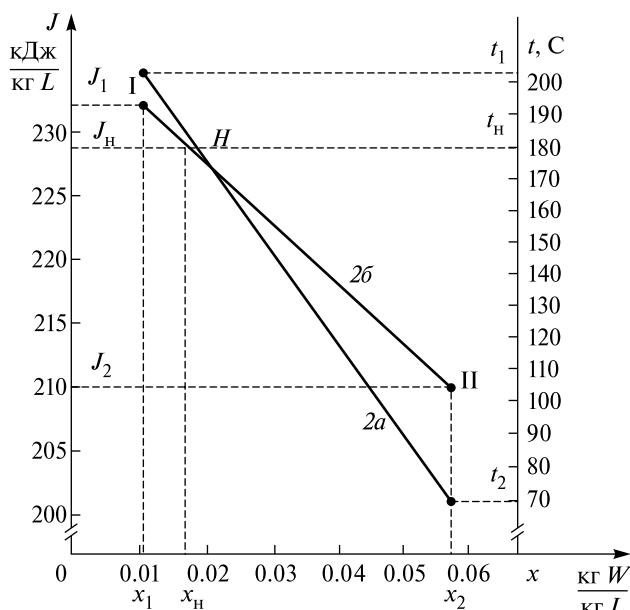


Рис. 4. J - x диаграмма процесса сушки в прямоугольной координатной системе Эйлера: I-II для типового расчета сушки в действительной сушилке; H-II для сушилки с учетом продольной диффузии ($Pe = 10$); 2 – зависимость температуры воздуха от влагосодержания: a) с учетом продольной диффузии; б) без учета продольной диффузии (ступеньки энталпии от J_1 до J_2 и температур от t_1 до t_2 учитывают их скачки на входе в сушильном агенте от влагосодержания x_1 до x_2 при учете продольной диффузии).

На рис. 6 показана зависимость влияния числа Пекле на увеличение длины и объема барабана сушилки по сравнению с расчетом по типовому алгоритму, не учитывающему продольную диффузию сушильного агента. Как видно из графика этого рисунка, при числе Пекле $Pe < 30$ продольную диффузию необходимо учитывать, так как длина и объем сушильного барабана возрастают на 10% и более. Так, при $Pe = 10$ они увеличиваются на 18%: длина с 17 до 20.14 м, а объем с 80.7 до 95.6 м³ при расчетном диаметре $d_a = 2.46$ м.

В табл. 2 приведены результаты расчетов основных параметров барабанной сушилки по типовому алгоритму без продольной диффузии как функции относительной длины барабана, а в табл. 3 тоже результаты, но с учетом продольной диффузии при числе Пекле $Pe = 10$.

Представленные в расчетах параметры позволяют на графиках в прямоугольной координатной системе Эйлера оценить влияние продольной диффузии на рабочие и равновесные линии барабанной сушилки (рис. 4).

Как видно из графиков на рис. 5, продольная диффузия при числе Пекле $Pe = 10$ уменьшает движущую силу процесса массопередачи, так как:

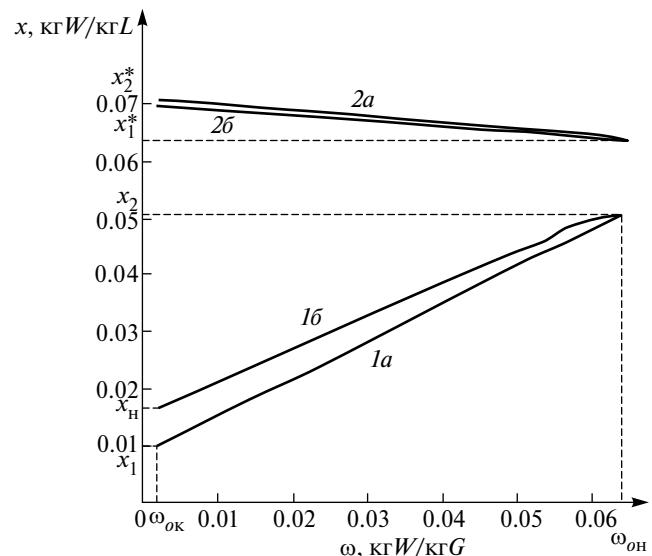
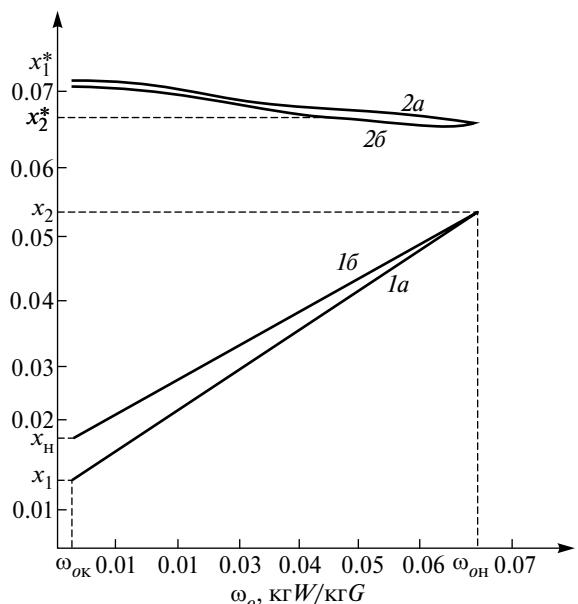


Рис. 5. Зависимость рабочего (1a) и равновесного (2a) влагосодержания в воздухе от относительной влажности частиц поваренной соли без учета продольной диффузии, рассчитанные по типовому алгоритму; 1a, 2a – соответственно рабочее и равновесное влагосодержание в воздухе от относительной влажности частиц поваренной соли с учетом продольной диффузии при числе Пекле $Pe = 10$.

во-первых, рабочая линия (кривая I_1) идет выше рабочей линии, рассчитанной по типовому алгоритму (кривая Ia);

во-вторых, равновесная линия (кривая $2a$) идет ниже равновесной линии, рассчитанной по типовому алгоритму, не учитывающему продольную диффузию (кривая 2δ).

Все вместе приводят к уменьшению средней движущей силы от значения:

Таблица 2. Зависимости основных параметров барабанной сушилки от безразмерной длины барабана, рассчитанные по типовому алгоритму без учета продольной диффузии (обозначения параметров представлены в табл. 1)

Наименование параметра	Относительная безразмерная высота сушилки, z (м)											
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	
Относительная влажность частиц, ω_i (кгW/кгG)	229.8	0.015	0.1058	0.0161	230.5	46.09	200	0.0709	0.0099	0.002		
Влагосодержание воздуха, x_i (кгW/кгL)	227.9	0.021	0.1048	0.0226	228.4	45.94	186.8	0.0703	0.0139	0.008		
Расчетное влагосодержание в воздухе, x_{pi} (кгW/кгL)	225.9	0.028	0.1039	0.0291	226.3	45.78	173.5	0.0696	0.018	0.014		
Температура насыщенного пара, t_i (°C)	224	0.034	0.103	0.0355	224.2	45.63	160.5	0.0689	0.0221	0.021		
Температура частиц, t_{mi} (°C)	222.1	0.04	0.1021	0.0417	222.1	45.47	147.7	0.0682	0.0262	0.027		
Заданная энталпия одного килограмма сухого воздуха, J_i (кДж/кгL)	220.2	0.046	0.1012	0.0448	220	45.31	135.1	0.0675	0.0303	0.033		
Парциальное давление паров, P_i (ат)	218.3	0.052	0.1003	0.0541	218	45.16	122.8	0.0669	0.0344	0.039		
Давление паров при температуре мокрого термометра, P_{pi} (ат)	216.4	0.058	0.0994	0.0601	215.9	45	110.6	0.0662	0.0384	0.045		
Относительная влажность воздуха, F_{ii} (%)	214.5	0.07	0.0985	0.0661	213.8	44.84	98.5	0.0656	0.0425	0.051		
Энталпия, рассчитанная по методике половинного деления, J_{ri} (кДж/кгL)	212.7	0.125	0.0976	0.0720	211.7	44.69	86.7	0.0649	0.0466	0.058		
	209.6	0.235	0.0961	0.0779	209.6	44.42	75	0.0638	0.0507	0.064		

$$\Delta x_t = 0.0316 \frac{\text{кгW}}{\text{кгL}} \text{ до } \Delta x_{dc} = 0.027 \frac{\text{кгW}}{\text{кгL}}$$

и вызывает увеличение длины барабана с 17 до 20.14 м, то есть на 18%. Увеличение высоты тарельчатых и насадочных колонн массообменных аппаратов с уменьшением числа Пекле продольной диффузии известно из литературных источников. В представленных результатах расчетов это влияние продольной диффузии подтверждено и для массообменного процесса сушки в барабанной сушилке.

На рис. 6 представлен график зависимости увеличения длины и объема барабана от числа Пекле продольной диффузии.

При числе $Pe > 30$ это увеличение не превышает 10% и его можно не учитывать, а расчет проводить по типовому алгоритму. При уменьшении числа Пекле это превышение длины и объема барабана может составлять 20% и более. Так, при $Pe = 6$ это увеличение составляет 25%, а

при $Pe = 3$ длина и объем барабана должны быть увеличены не более чем в 1.4 раза. Дополнительные лопатки и другие устройства, устанавлива-

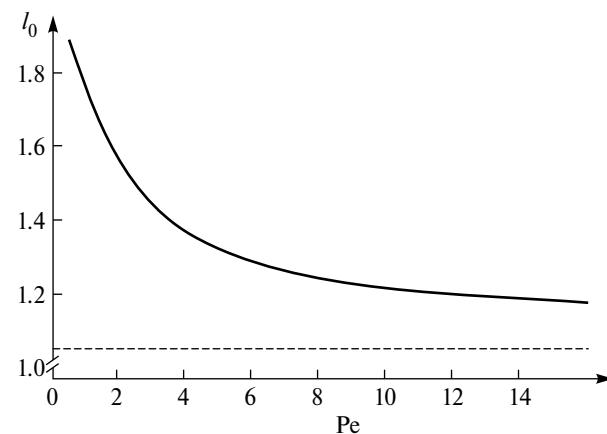


Рис. 6. Относительное увеличение длины и объема барабанной сушилки в зависимости от числа Пекле продольной диффузии.

Таблица 3. Результаты расчетов технологических параметров сушилки с учетом продольной диффузии

Наименование параметра	Относительная безразмерная высота сушилки, z (м)										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Относительная влажность частиц, ω_i (кгW/кгG)	0.068	0.026	0.1044	0.027	227	45.86	177.7	0.0699	0.0167	0.002	
Влагосодержание воздуха, x_i (кгW/кгL)	0.059	0.035	0.1028	0.036	223.7	45.59	157.5	0.0687	0.0231	0.013	
Расчетное влагосодержание в воздухе, x_{pi} (кгW/кгL)	0.05	0.043	0.1016	0.045	220.9	45.39	140.4	0.0679	0.0285	0.023	
Температура насыщенного пара, t_i (°C)	0.043	0.05	0.1004	0.052	218.5	45.18	126.1	0.067	0.0333	0.031	
Температура частиц, t_{mi} (°C)	0.037	0.056	0.0994	0.058	216.5	45	114	0.0662	0.0373	0.038	
Заданная энталпия одного килограмма сухого воздуха, J_i (кДж/кгL)	0.032	0.061	0.0985	0.063	214.7	44.84	103.7	0.0656	0.0408	0.044	
Парциальное давление паров, P_i (ат)	0.027	0.082	0.0978	0.067	213.2	44.73	95	0.0651	0.0437	0.049	
Давление паров при температуре мокрого термометра, P_{pi} (ат)	0.023	0.118	0.0972	0.071	211.9	44.61	87.7	0.0663	0.0463	0.054	
Относительная влажность воздуха, F_{ii} (%)	0.018	0.162	0.0967	0.074	210.8	44.53	81.7	0.0643	0.0484	0.057	
Градиент концентрации, J_r (кгW/кгL)	0.012	0.209	0.0963	0.076	210	44.45	77.1	0.064	0.05	0.061	
	0	0.235	0.0961	0.0779	209.6	44.41	75	0.0638	0.0507	0.064	

емые внутри барабана, должны перемешивать высушиваемые частицы в радиальном направлении и нивелировать осевое продольное перемешивание потока сушильного агента.

Кроме того, по данным табл. 2 и 3, можно определять влияние продольной диффузии не только на массопередачу, но и теплофизические характеристики сушки: энталпию, температуру, относительную влажность парциальное давление водяных паров в воздухе, температуру мокрого термометра и давление водяных паров, соответствующие этой температуре.

Так, на рис. 6 показано, что продольная диффузия снижает не только движущую силу процесса массопередачи и энталпию, но и температуру сушильного агента, со скачком этого параметра на входе соответственно от $t_1 = 200^\circ\text{C}$ до $t_h = 177.7^\circ\text{C}$ (см. последнюю строку табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для процесса сушки в барабанной сушилке продольную диффузию необходимо учитывать при числе Пекле продольной диффузии $\text{Pe} \leq 30$,

когда длина барабана l_d и его объем увеличиваются на 10 и более процентов по сравнению с типовым расчетом, основанным на режиме идеального вытеснения по сушильному агенту (рис. 6).

Относительное увеличение объема и длины барабана при учете продольной диффузии по сравнению с типовым расчетом резко возрастает при числе Пекле $\text{Pe} < 4$ и достигает 50 и более процентов. Поэтому целесообразно для интенсификации процессов тепло- и массопередачи выравнивать профиль скорости сушильного агента по радиусу барабана, приближая его к структуре потока идеального вытеснения.

Разработанный алгоритм расчета параметров барабанной сушилки позволяет аналитически определять их численные значения и отражать на графиках как в традиционной для процесса сушки косоугольной J - x диаграмме Рамзина, так и в обычной для массообменных процессов прямоугольной координатной системе Эйлера.

Сравнение результатов расчета параметров рабочей и равновесной линий показывает, что, во-первых, рабочая линия сушильного агента-воздуха имеет на входе скачок влагосодержа-

ние от x_1 до x_h для сушки с учетом продольной диффузии по сравнению с типовым алгоритмом расчета, а, во-вторых, сама кривая влагосодержания воздуха с учетом процесса сушки идет выше, чем в типовом расчете. Это в целом снижает локальные движущие силы процесса массопередачи, а с ними и среднюю движущую силу. Так, при числе $Pe = 10$ средняя движущая сила снижается с 0.0316 до 0.0274. Это приводит к необходимости увеличения длины барабана на 18.5% (с 17 до 20.14 м).

При числе Пекле продольной диффузии $Pe \geq 30$ расчет барабанной сушки можно вести по типовому алгоритму, так как продольная диффузия увеличивает геометрические размеры: длину и объем барабана менее чем на 10%. Особенно сильно влияние продольной диффузии на выше-названные геометрические размеры при числе Пекле $Pe < 6$, когда эти размеры возрастают на 25 и более процентов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00496, <https://rscf.ru/project/25-29-00496/>, “Моделирование тепло- и массообменных процессов в экологическом и нефтегазоперерабатывающем оборудовании с учетом структуры потоков”.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

G	производительность по абсолютно сухим; частицам высушиваемого материала, кг/с;
W	производительность по удаляемой влаге из высушиваемых частиц, кг/с;
L	расход сухого воздуха, кг/с;
V_D	скорость продольной диффузии;
V_m	скорость молекулярной диффузии;
D_l	коэффициент продольной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;
ρ	плотность сушильного агента, $\text{кг}/\text{м}^3$;
D	коэффициент молекулярной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;
G_h	производительность на входе по частицам высушиваемого материала, кг/с;
ω_h	абсолютная массовая влажность частиц на входе в барабан, $\text{кг}W/\text{кг}G_h$;
ω_k	абсолютная массовая влажность частиц на выходе из барабана, $\text{кг}W/\text{кг}G_k$;
Pe	критерий Пекле;
k_V	объемный коэффициент массопередачи, $\frac{\text{кг}W}{\text{с} \text{м}^3 \left(\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L} \right)}$;
k'_V	объемный фиктивный коэффициент

ЧЕП $_x^*$	массопередачи, $\frac{\text{кг}W}{\text{с} \text{м}^3 \left(\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L} \right)}$;
A_v	число единиц переноса;
V_b	Напряженность барабана по влаге, $\text{кг}W/\text{м}^3\text{с}$;
Δx_{cp}	объем барабана сушилки, м^3 ;
x_1, x_2	средняя движущая сила массопередачи по сушильному агенту;
v_e	начальное и конечное влагосодержание воздуха;
H	скорость воздуха, м/с;
d_a	длина барабана, м;
g_h	диаметр барабана, м;
H_d	градиент влагосодержания воздуха на входе по безразмерной длине барабана z , $\frac{\text{кг}W}{\text{кг}L}$;
	длина барабана с учетом продольной диффузии, м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Несторов А.В. Промышленная сушка: монография / А. В. Несторов. 3-е изд. Санкт Петербург : Лань, 2023.
2. Бобков В.И., Борисов В.В., Дли М.И., Мешалкин В.П. Интенсивные технологии сушки кускового материала в плотном слое // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 1. С. 72.
3. Акулич П.В., Слижук Д.С. Тепломассообмен в процессах распылительной сушки при конвективно-радиационном энергоподводе // Теоретические основы химической технологии. 2023. Т. 57. № 4. С. 389.
4. Меньшутина Н.В., Гордиенко М.Г., Войновский А.А., Кудра Т. Динамические критерии для оценки эффективности энергопотребления сушильного оборудования // Теоретические основы химической технологии. 2005. Т. 39. № 2. С. 170.
5. Кошелева М.К., Дорняк О.Р. Моделирование процессов тепло- и массопереноса при конвективной сушке хлопчатобумажных тканей // Теоретические основы химической технологии. 2024. Т. 58. № 1. С. 27.
6. Акулич П.В., Слижук Д.С. Тепломассоперенос в плотном слое при дегидратации коллоидных и сорбционных капиллярно-пористых материалов в условиях нестационарного радиационно-конвективного энергоподвода // Теоретические основы химической технологии. 2022. Т. 56. № 2. С. 148.
7. Акулич П.В., Слижук Д.С. Термогидродинамические процессы при распылительной сушке в условиях конвективно-радиационного энерго-

- подвода // Теоретические основы химической технологии. 2021. Т. 55. № 1. С. 34.
8. Шевцов А., Сайко Д.С., Дранников А.В., Шатунова Н.В. К решению краевой задачи теплопроводности гранулы с пленкой раствора на ее поверхности в процессе распылительной сушки // Теоретические основы химической технологии. 2013. Т. 47. № 6. С. 630.
 9. Сажин Б.С., Кочетов Л.М., Белоусов А.С. Удерживающая способность и структура потоков в вихревых аппаратах // Теоретические основы химической технологии. 2008. Т. 42. № 2. С. 135.
 10. Мошкин В.И., Десятов А.В., Какуркин Н.П. Гидродинамическая устойчивость двухфазного неизотермического потока в противоточной распылительной сушилке // Теоретические основы химической технологии. 2007. Т. 41. № 6. С. 619.
 11. Сажин Б.С., Сажин В.Б., Отрубянников Е.В., Кочетов Л.М. Сушка в активных гидродинамических режимах // Теоретические основы химической технологии. 2008. Т. 42. № 6. С. 638.
 12. Левенштиль О. Инженерное оформление химических процессов / О. Левеншпиль; Пер. с англ. под ред. и с доп. чл.-кор. АН СССР М.Г. Слинько. Москва : Химия, 1969.
 13. Боровиков В.М. Теплотехническое оборудование. М.: "Академия", 2011.
 14. Кафаров В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств: учебное пособие для вузов / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2024.
 15. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. — 14-е изд. М.: Альянс, 2014.
 16. Долгунин В.Н. Непрерывное смешивание сыпучих материалов при импульсном воздействии на сегрегированный поток порционно дозируемого компонента // Теоретические основы химической технологии. 2019. № 2. С. 174.
 17. Долгунин В.Н. Технологические возможности управления структурой потоков в барабанном теломассообменном аппарате // Химическая технология. 2012. № 10. С. 600.
 18. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Лаптева Е.А. Проблемы и решения масштабного перехода в химической технологии // Труды Академэнерго, 2019. № 4. С. 21.
 19. Голованчиков А.Б., Залипаева О.А., Меренцов Н.А. Моделирование сорбционных процессов с учетом структуры потока: монография // Волгоград: ВолгГТУ, 2018.
 20. Меренцов Н.А., Голованчиков А.Б., Топилин М.В., Персидский А.В. Экспериментальное определение параметров структуры потока фильтрационных течений через слои гранул адсорбентов в экологическом массообменном оборудовании // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 11. С. 42.
 21. Golovanchikov A.B., Zalipaeva O.A., Merentsov N.A., Shibitova N.V. Influence of the Shape of Differential Response Curve on Design Calculations of Chemical Reactor // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2023. V. 57, 4. P. 760.
 22. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Topilin M.V., Persidskiy A.V. Modeling and Calculation of an Adsorber for Methanol Vapor Capture Using Active Carbon with a Diffusion Flow Structure in the Gas Phase // Chemical and Petroleum Engineering. 2023. V. 59, 5-6. P. 376.
 23. Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н. Расчет и проектирование пневматической сушильной установки: учебно-методическое пособие / СПб ГТУ РП. -СПб., 2012.
 24. Кузнецов И.В., Шахов С.В., Шаршов В.Н., Пивоваров Я.С. Движение продукта в барабане с положительным углом наклона // Современные научные технологии. 2013. № 8-2. С. 250.
 25. Голованчиков А.Б., Шурак А.А., Меренцов Н.А., Шибитова Н.В. Программа для расчета параметров барабанной сушилки с учетом продольной диффузии. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022613695 от 15.03.2022 г. РФ. Правообладатель: ФГБОУ ВО ВолгГТУ.

INFLUENCE OF LONGITUDINAL DIFFUSION ON TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF DRUM DRYER

A. B. Golovanchikov, N. A. Merentsov, N. A. Prokhorenko,

A. A. Shurak, M. V. Topilin*

FGBOU VO "Volgograd State Technical University", Volgograd, Russia

*e-mail: topilinmik@gmail.com

Abstract. On the basis of differential equations of material balance and mass transfer for dried material and drying agent the equations of working and equilibrium line at countercurrent motion of phases in a drum dryer are derived. The algorithm of calculation is offered and comparison of technological parameters of drying process taking into account longitudinal diffusion with similar parameters calculated by the typical algorithm is carried out. Graphs of the obtained results in oblique Ramsin diagram and rectangular Euler coordinates are given. It is shown that taking into account the Peclet number of longitudinal diffusion, that is, the transition from the displacement mode to the longitudinal mixing mode, the calculated length and volume of the drum should be increased by 1.1 and more times at $\text{Pe} < 30$.

Keywords: *drying, longitudinal diffusion, Peclet number of longitudinal diffusion, moisture content gradient of drying agent - air, humidity of dried particles, moisture content of air, length and volume of the drum*