

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ ГРАНУЛ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОГО УДОБРЕНИЯ В ПЛОТНОМ СЛОЕ

Л.Н. Овчинников, С.И. Медведев

Лев Николаевич Овчинников *, Сергей Иванович Медведев

Кафедра процессов и аппаратов химической технологии, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: ovchinnikovnl_1972@mail.ru*

В работе приведена методика расчета, позволяющая с помощью специально поставленного эксперимента установить количественную зависимость определяемого критерия (величины), например, Шервуда (массообмен), Нуссельта (теплообмен) или влагосодержания частиц от определяющих критериев Рейнольдса, Шмидта, температуры материала и др. Эти связи представлены степенными функциями в виде критериальных уравнений тепло-массообмена для выбранного диапазона значений критерия Рейнольдса $Re_z = 250-500$, рассчитанного по газовой фазе. В расчетно-экспериментальном исследовании рассмотрена конвективная сушка нагретым воздухом влажных гранул азотно - фосфорно - калийного (NPK) органоминерального удобрения в плотном слое лабораторной цилиндрикоконической сушилки. Гранулы имеют цилиндрическую форму с размером частиц 5×5 мм. Методика эксперимента предполагала проведение в периодическом процессе исследований по определению изменения во времени влажности гранул удобрения, температуры газа под решеткой, в слое, над слоем и в частице при различных расходах газового теплоносителя. Обработка результатов экспериментальных исследований, осуществленная с помощью метода наименьших квадратов, позволила рассчитать экспериментальные коэффициенты, входящие в критериальные уравнения. Иллюстративно показано, что коэффициент массоотдачи возрастает с увеличением критерия Рейнольдса вплоть до достижения им значения $0,8 Re_{кр1}$ (начало псевдооживления), соответствующего рациональным условиям сушки гранул. Сравнение расчетных и экспериментальных значений критерия Шервуда, критерия Нуссельта и влагосодержания частиц высушиваемого материала показало их удовлетворительную сходимость в рассматриваемых гидродинамических условиях сушки влажных частиц, что позволяет рекомендовать полученные экспериментальные зависимости к практическому применению.

Ключевые слова: сушка, массообмен, гранула, удобрение, критерий

STUDY OF HEAT- AND MASS TRANSFER DURING DRYING OF GRANULES OF ORGANO-MINERAL FERTILIZER IN DENSE LAYER

L.N. Ovchinnikov, S.I. Medvedev

Lev N. Ovchinnikov *, Sergey I. Medvedev

Department of Chemical Engineering, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetievskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: ovchinnikovnl_1972@mail.ru*

The paper presents a calculation method that enables the use of specially performed experiments to establish the quantitative relationship defined by a criterion(variable), for example, Sherwood (mass transfer), Nusselt (heat transfer) or the moisture content of the particles from the defining criterion of the Reynolds, Schmidt, and temperature. These relations are represented by power functions in the form of criterial equations of heat and mass transfer for the selected range of values of the Reynolds criterion $Re_g = 250-500$ calculated for the gas phase. In the calculation-experimental study, the convective drying of wet granules of nitrogen - phosphorus - potassium

(NPK) organic mineral fertilizer in a dense layer of the laboratory cylindrical-conical dryer by heated air is considered. The granules have a cylindrical shape with a particle size of five by five mm. The experimental technique involves conducting periodic studies to determine the time change in the moisture content of fertilizer granules, the temperature of the gas under the grid, layer, above the layer and the particle at different flow rates of the gas coolant. Processing of the results of experimental studies, carried out using the method of least squares, allowed to calculate the experimental coefficients included in the criterion equations. Illustratively it is shown that the mass transfer coefficient increases with the Reynolds criterion until they reach values of $0.8 Re_{кр1}$. (the beginning of fluidization), corresponding to the rational conditions of drying of the granules. Comparison of the calculated and experimental values of the Sherwood criterion, Nusselt criterion and moisture content of the dried material particles showed their satisfactory convergence in the considered hydrodynamic conditions of drying wet particles, which makes it possible to recommend the obtained experimental dependences for practical application.

Key words: drying, mass transfer, granule, fertilizer, criterion

Для цитирования:

Овчинников Л.Н., Медведев С.И. Исследование теплообмена при конвективной сушке гранул органоминерального удобрения в плотном слое. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 6. С. 91–97

For citation:

Ovchinnikov L.N., Medvedev S.I. Study of heat- and mass transfer during drying of granules of organo-mineral fertilizer in dense layer. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 6. P. 91–97

ВВЕДЕНИЕ

Большинство методик расчета и проектирования сушильной техники базируются на решении дифференциальных уравнений теплообмена в сочетании с необходимым количеством вспомогательных экспериментальных уравнений [1-6], соответствующих выбранному интервалу технологических условий работы конкретного типа сушилок. При реализации подобного рода задач, например, для случая конвективной сушки гранул в плотном слое, адекватность разработанной методики расчета реальным условиям процесса сушки во многом определяется правильностью выбора экспериментальных зависимостей для определения коэффициентов тепло- и массоотдачи [1-5].

В связи с этим, целью работы являлось исследование тепло-массообменных явлений, протекающих в процессе сушки в плотном слое гранулированных NPK органоминеральных удобрений (ОМУ) [5, 6]. Методика проведения исследований предполагала нахождение экспериментальных зависимостей вида: $Sh = f(Re_r, Sc)$ (массообмен), $Nu = f(Re_r, Pr)$ (теплообмен), влагосодержания гранул от их температуры $U(t_{mat})$.

Экспериментальные уравнения необходимы для математического описания кинетики и определения времени нагревания и сушки влажных частиц [7-18] технологических материалов в различных видах взвешенного слоя.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Методика проведения экспериментов предполагала определение во времени изменения влажности исследуемого материала, температуры газа под решеткой, в слое и над ним, а также в грануле при различных расходах газового теплоносителя с целью получения экспериментальных зависимостей. Исследования проводились на усовершенствованной установке, изображенной на рис. 1.

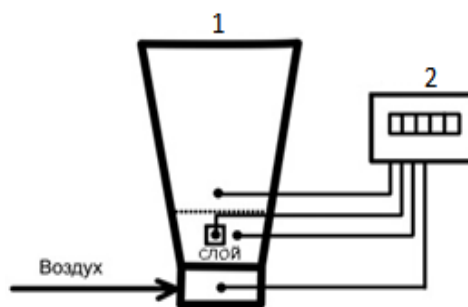


Рис. 1. Схема измерения температур в аппарате: под решеткой, в слое, над слоем и в грануле: 1 - сушилка; 2 - устройство для измерения температуры

Fig. 1. Temperature measurement scheme in the device: under the grate, in the layer above the layer and in the granule: 1-dryer; 2- temperature measuring device

Продолжительность сушки гранул во всех опытах составляла 20 мин. Убыль влаги в пробах фиксировалась в течение опыта через каждые 2 мин на электронных весах марки MW-1200.

Методика получения критериального уравнения массообмена $Sh = f(Re_r, Sc)$ базируется на решении системы уравнений (1-13).

Критерий Шервуда:

$$Sh = \frac{\beta d}{D}, \quad (1)$$

где β – коэффициент массоотдачи, d – диаметр частиц, D – коэффициент диффузии паро-газовой смеси.

Уравнение для определения коэффициента массоотдачи [7]:

$$\beta = \frac{G_{H_2O} \cdot R \cdot T}{F_{исп} \cdot \Delta P_{ср} \cdot M_{H_2O} \cdot \rho_{рт} \cdot g \cdot \tau}, \quad (2)$$

где G_{H_2O} – количество испарившейся влаги в процессе сушки; $F_{исп}$ – площадь поверхности испарения; $\Delta P_{ср}$ – средняя движущая сила; τ – время; R – универсальная газовая постоянная; M_{H_2O} – молекулярная масса воды.

Средняя движущая сила процесса сушки:

$$\Delta P_{ср} = P_{нас} - \frac{P_{пн} + P_{пк}}{2}, \quad (3)$$

где $P_{нас}$ – давление насыщенного водяного пара в аппарате при температуре слоя; $P_{пн}$ – парциальное давление водяного пара в воздухе в начале опыта; $P_{пк}$ – парциальное давление водяных паров в воздухе в конце опыта.

Парциальные давления водяного пара в воздухе в начале и в конце опыта, Па:

$$P_{пн} = \frac{P \cdot x_n}{0,622 + x_n}; \quad (4)$$

$$P_{пк} = \frac{P \cdot x_k}{0,622 + x_k}; \quad (5)$$

Влагосодержание воздуха в конце опыта:

$$x_k = x_n + \frac{\Delta m}{G_{воз}}, \quad (6)$$

где x_n – начальное влагосодержание воздуха, $G_{воз}$ – количество воздуха, поданного за время опыта.

$$G_{воз} = V \cdot \tau \cdot \rho_v, \quad (7)$$

где V – объемный расход воздуха; τ – время опыта; ρ_v – плотность воздуха.

Коэффициент диффузии парогазовой смеси [4]:

$$D = D_0 \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2}, \quad (8)$$

D – коэффициент диффузии парогазовой смеси в воздухе при P и T в слое, D_0 – коэффициент диффузии парогазовой смеси в воздухе при нормальных условиях, $P_0 = 760$ мм рт. ст., $T_0 = 273$ К.

Критерий Рейнольдса (газовый) Re_r :

$$Re_r = \frac{wd\rho}{\mu}, \quad (9)$$

где w – фиктивная скорость воздуха в аппарате; μ – динамический коэффициент вязкости воздуха.

Критерий Шмидта:

$$Sc = \frac{\nu}{D}, \quad (10)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха.

Для рассматриваемых условий сушки гранул соотношение коэффициентов, входящих в критерий Шмидта (10), приблизительно равно единице $\frac{\nu}{D} \cong 1$, поэтому в дальнейшем при расчете уравнения массообмена число Шмидта не учитывалось, т.е. зависимость принимала вид:

$$Sh = a Re^b, \quad (11)$$

где a и b – коэффициенты, определяемые из эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены результаты экспериментальных исследований сушки влажных гранул NPK ОМУ при постоянной температуре воздуха под решеткой и различных расходах газового теплоносителя в диапазоне 28-36 м³/ч.

Обработка результатов экспериментальных исследований, приведенных в табл. 1, методом МНК, включающим решение системы уравнений (12), позволяет рассчитать экспериментальные коэффициенты, a и b , входящие в уравнение (13).

$$\begin{cases} \sum \lg Nu = n \lg a + b \sum \lg Re \\ \sum (\lg Nu \lg Re) = \sum \lg Re \lg a + b \sum \lg Re^2 \end{cases} \quad (12)$$

где n – число опытов.

С учетом рассчитанных коэффициентов, критериальное уравнение массообмена для сушки гранул NPK ОМУ принимает вид:

$$Sh = 0,16 Re_r^{0,37}, \quad (13)$$

Ряд исследователей [1-7] полагают, что коэффициенты массоотдачи при конвективной сушке частиц в слое можно рассчитывать по зависимостям для «чистого» теплообмена, т.е. с заменой β на коэффициент теплоотдачи α при условии равенства параметров $Sh = Nu$ ($Sc = 1$, $Pr = 1$), что соответствует условиям сушки гранул в лабораторной установке.

В этом случае экспериментальное уравнение теплообмена запишется в виде:

$$Nu = 0,16 Re_r^{0,37}. \quad (14)$$

Результаты экспериментальных исследований сушки NPK органоминерального удобрения
 Table1. The results of experimental studies on drying NPK organio-mineral fertilizer

№ п/п	Номер эксперимента											
	№1				№2				№3			
	Время, мин	Масса слоя, гр.	Влагодержание, масс %		Время, мин	Масса слоя, гр.	Влагодержание, масс %		Время, мин	Масса слоя, гр.	Влагодержание, масс %	
			Абс.	Отн.			Абс.	Отн.			Абс.	Отн.
1	0	40	7,60	7,00	0	40	9,99	9,00	0	40	10,30	9,25
2	2	39	4,89	4,62	2	38,8	6,66	6,19	2	38,6	6,40	5,96
3	4	38,6	3,8	3,63	4	38,2	5,00	4,71	4	38	4,73	4,47
4	6	38,3	2,99	2,87	6	37,8	3,89	3,70	6	37,7	3,90	3,71
5	8	38	2,17	2,11	8	37,5	3,05	2,93	8	37,4	3,06	2,94
6	10	37,8	1,63	1,59	10	37,3	2,50	2,41	10	37,1	2,23	2,16
7	12	37,6	1,09	1,06	12	37	1,67	1,6	12	36,9	1,67	1,63
8	14	37,4	0,54	0,53	14	36,8	1,11	1,09	14	36,7	1,11	1,09
9	16	37,3	0,27	0,27	16	36,6	0,56	0,55	16	36,5	0,56	0,55
10	18	37,2	0,20	0,20	18	36,5	0,28	0,27	18	36,4	0,28	0,27
11	20	37,2	0,20	0,20	20	36,4	0,20	0,20	20	36,3	0,2	0,2

Примечание: Расход воздуха соответствует номеру эксперимента: №1- 28 м³/ч; № 2- 32 м³/ч; № 3- 36 м³/ч

Note: the air flow rate corresponds to experiment number: N 1-28 m³/h; N 2 - 32 m³/h; N 3 - 36 m³/h

На рис. 2 приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений зависимости коэффициента массоотдачи от критерия Рейнольдса. Из рисунка следует, что коэффициент массоотдачи β возрастает и при увеличении критерия Рейнольдса до экспериментально найденного значения 330 ($0,8 Re_{кр1}$), достигает $8,5 \cdot 10^{-3}$ м/с, соответствующего рациональным условиям сушки гранул.

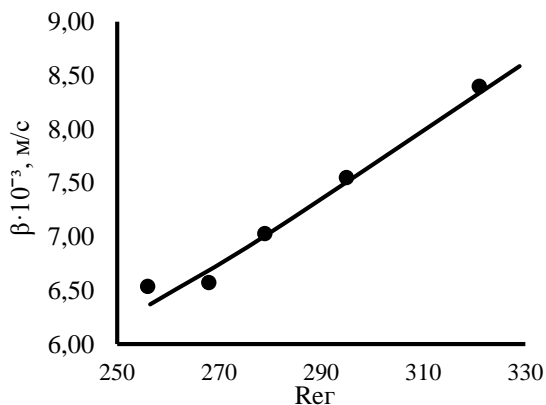


Рис. 2. Зависимость коэффициента массоотдачи β от критерия Рейнольдса для $Re_g = 250-330$. Линия- расчет, точки- эксперимент

Fig. 2. The dependence of the coefficient of mass transfer β on the Reynolds criterion for $Re_g = 250-330$. Line-calculation, points-experiment

На рис. 3 представлена корреляционная зависимость, подтверждающая удовлетворительную сходимость расчетного значения критерия Шервуда (Sh_p) от его экспериментального значения ($Sh_{эксп}$).

Удовлетворительная сходимость между расчетом и экспериментом, приведенная на рис. 2 и 3, и не превышающая статистической погрешности в 5%, позволяет рекомендовать критериальные зависимости (13) и (14) к их практическому применению при расчете и проектировании сушилок с плотным слоем [19-20].

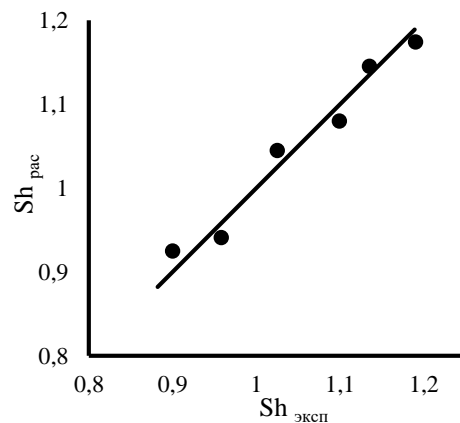


Рис. 3. Корреляционная зависимость расчетного значения критерия Шервуда (Sh_p) от его экспериментального значения ($Sh_{эксп}$). Линия-расчет; точки – эксперимент

Fig. 3. Correlation between the calculated values of the criterion of Sherwood (Sh_c) and its experimental values (Sh_{exp}). Line-calculation; points-experiment

В табл. 2 представлены результаты экспериментальных исследований по определению зависимости влагосодержания частиц от их температуры $U(t_{мат})$.

Опыты проводились при различных расходах воздуха в диапазоне 28-36 м³/ч. Температура воздуха под решеткой была постоянной $t_p = 80$ °С. Продолжительность опыта составляла 20 мин. Через каждые 2 мин отбирались пробы для определения влажности продукта.

Термопара, вмонтированная в гранулу, находящуюся по высоте в середине слоя частиц, фиксировала изменение ее температуры через каждые 2 мин. В этом случае выгрузка частиц слоя для определения их влажности не проводилась.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований влагосодержания частиц от их температуры
Table2. The results of experimental investigations of the moisture content of particles on their temperature

№ п/п	Номер эксперимента														
	№1					№2					№3				
	Вре-мя, мин	Масса слоя, гр.	Абс. влаж-ность, масс %	Темпера-тура, °С		Вре-мя, мин	Масса слоя, гр.	Абс. влаж-ность, масс %	Темпера-тура, °С		Вре-мя, мин	Масса слоя, гр.	Абс. влаж-ность, масс %	Темпера-тура, °С	
				В слое	В гра-нуле				В слое	В гра-нуле				В слое	В гра-нуле
1	0	24	28,4	25	25	0	24	23,3	25	25	0	24	29,6	25	25
2	3	21,3	21,9	64,3	35	3	21,6	24,2	67,9	38,8	3	21,2	24	68,5	40,3
3	6	19,2	15,6	66,5	39	6	19,2	20,1	72,3	39,8	6	18,9	22,2	71,6	43,9
4	9	17,8	15,8	70,1	42,3	9	17,2	13,3	72,9	40,6	9	16,8	21,4	73,6	51,8
5	12	16,3	13,9	70,6	44,8	12	15,9	11,8	73	42,1	12	14,8	12,7	75,1	53,3
6	15	15	11	74,2	46,1	15	14,7	9,8	74,6	45,4	15	13,6	9,5	76,2	54,7
7	18	13,9	9	76,2	50	18	13,7	8	77,6	50,7	18	12,7	7,8	77,5	57,9
8	21	13,1	7,2	77,2	52,2	21	12,9	7,5	78,6	51,6	21	12	6,7	77,8	58,7
9	24	12,4	7	77,6	53,2	24	12,2	6,4	78,6	55	24	11,3	5,3	78	62,8
10	27	11,7	5,2	78	58,8	27	11,5	5,4	78,9	56,3	27	10,8	4,7	78,7	66,5
11	30	11,2	4,8	78,4	61,1	30	11	4,2	79,2	58,2	30	10,4	4,5	79,2	68
12	33	10,8	4,2	78,4	62,5	33	10,6	3,8	79,3	61,3	33	9,9	3,1	79,3	68,5
13	36	10,4	3,9	79,2	64,5	36	10,2	3,2	79,6	65	36	9,6	3	79,5	68,9
14	39	10	0	79,9	66,7	39	9,93	0	79,7	68,1	39	9,4	0	79,9	69,3

Примечание: Расход воздуха соответствует номеру эксперимента: №1- 28 м³/ч; № 2- 32 м³/ч; № 3- 36 м³/ч
Note: the air flow rate corresponds to experiment number: N 1-28 м³/h; N 2 - 32 м³/h; N 3 - 36 м³/h

Результаты экспериментальных исследований, представленные в табл. 2, графически проиллюстрированы на рис. 4 в виде зависимости влагосодержания частиц от их температуры $U = f(t_{mat})$ при различных значениях критерия Рейнольдса в диапазоне $Re_r = 313-402$.

Из рис. 4 видно, что отклонение экспериментальных точек от расчетной линии в диапазоне значений критерия $Re_r = 313-402$ не превышает 5%, что позволяет усредненную расчетную зависимость аппроксимировать выражением:

$$U = a \cdot e^{b \cdot t_m} \quad (15)$$

где a и b – коэффициенты, определяемые из эксперимента.

Логарифмируя обе части равенства (15), получаем

$$\lg U = \lg a + (b \cdot \lg e) \cdot t_m \quad (16)$$

или

$$U = A + B \cdot t_m,$$

где

$$A = \lg(a), B = b \cdot \lg(e), U = \lg U.$$

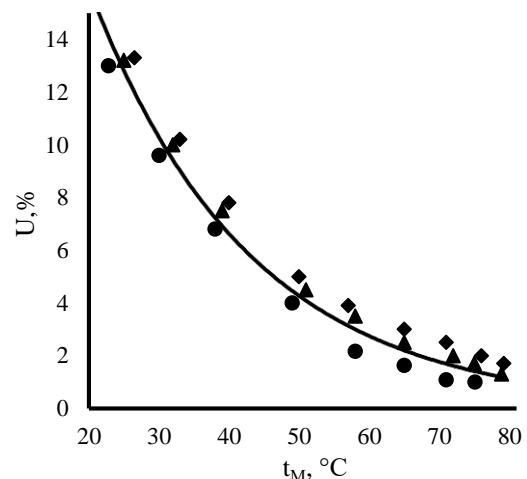


Рис. 4. Зависимость влагосодержания U от температуры материала t_m при различных значениях критерия Рейнольдса (Re_r). Линия – расчет. Точки: ● - $Re_r = 313$; ▲ - $Re_r = 342$; ■ - $Re_r = 402$
Fig. 4. Dependence of moisture content U on the temperature of the material t_m at different values of the Reynolds criterion (Re_r). Line-calculation. Points: ● - $Re_r = 313$; ▲ - $Re_r = 342$; ■ - $Re_r = 402$

Применяя метод наименьших квадратов к уравнению (16), приходим к системе уравнений

$$\begin{cases} n \cdot A + B \cdot \sum t_{mi} = \sum \lg U \\ A \cdot \sum t_{mi} + B \cdot \sum t_{mi}^2 = \sum t_{mi} \cdot \lg U \end{cases} \quad (17)$$

где n – число опытов.

Обработка результатов экспериментальных исследований методом (МНК) с применением пакета электронных прикладных программ MathCAD позволила рассчитать коэффициенты a и b и аппроксимировать зависимость влагосодержания от температуры гранул в виде:

$$U = 2,6 e^{-0.037tm} \quad (19)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосов С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ИПК "ПресСТО". 2010. 364 с.
2. Овчинников Л.Н. Моделирование процесса сушки минеральных удобрений во взвешенном слое. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2009. Т. 52. Вып. 7. С. 122-124.
3. Овчинников Л.Н. Грануляция минеральных удобрений во взвешенном слое. Иваново: ИГХТУ. 2010. 168 с.
4. Митрофанов А.В., Мизонов В.Е., Огурцов А.В., Овчинников Л.Н. Моделирование и расчет гидромеханических процессов в кипящем слое. Иваново: ИГЭУ. 2015. 104 с.
5. Овчинников Л.Н., Овчинников Н.Л. Расчетно-экспериментальное исследование второго периода конвективной сушки гранул сорбента на основе торфа и глины. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2014. Т. 57. Вып. 10. С. 77-79.
6. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия. 1980. 248 с.
7. Овчинников Л.Н. Исследование процесса получения комплексных гранулированных органоминеральных удобрений пролонгированного действия на основе торфа. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2017. Т. 60. Вып. 9. С. 100-104.
8. Митрофанов А.В., Огурцов А.В., Мизонов В.Е., Овчинников Л.Н. Расчетно-экспериментальное исследование теплового процесса в кипящем слое. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2011. Т. 54. Вып. 5. С. 134-136.
9. Васильев А.Н., Северинов О.В. К расчету тепло- и влагообмена в плотном слое зерна. *Вестн. НГИЭИ*. 2016. № 4. С. 63-71.
10. Акулич П.Е., Драгун В.А., Куц П.С. Технологии и техника сушки и термообработки материалов. Минск: Белорус. наука. 2006. 190 с.
11. Митрофанов А.В., Мизонов Е.В., Tannous K. Математическая модель эволюции состояния псевдоожиженного слоя при влагопереносе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2015. Т. 58. Вып. 4. С. 75-78.
12. Рудобашта С.П. Математическое моделирование процесса конвективной сушки дисперсных материалов. *Изв. РАН. Энергетика*. 2000. № 4. С. 98.
13. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: Колос С. 2010. 478 с.
14. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М.: Химия. 1984. 320 с.

ВЫВОДЫ

Проведены в периодическом режиме лабораторные расчетно-экспериментальные исследования тепломассообмена при конвективной сушке гранул НРК органоминерального удобрения в фильтрующем слое частиц. Разработана лабораторная установка и методика получения критериальных уравнений тепломассообмена и экспериментальной зависимости влагосодержания частиц материала от их температуры, необходимых для реализации математического описания кинетики сушки влажных частиц гранулированных удобрений.

REFERENCES

1. Fedosov S.V. Heat and mass transfer in technological processes of construction industry. Ivanovo: IPC "Pressto". 2010. 364p. (in Russian).
2. Ovchinnikov L.N. Modeling of drying process of fertilizer in fluidized bed. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2009. V. 52. N 7. P. 122-124 (in Russian).
3. Ovchinnikov L.N. Granulation of mineral fertilizers in a fluidized bed. Ivanovo: ISUCT. 2010. 168 p. (in Russian).
4. Mitrofanov A.V., Mizonov V.E., Ogurtsov A.V., Ovchinnikov L.N. Modeling and calculation of hydro-mechanical processes in fluidized bed. Ivanovo: IGEU. 2015. 104 p. (in Russian).
5. Ovchinnikov L.N., Ovchinnikov N.L. Numerical and experimental investigation of second period of convective drying of sorbent granules based on peat and clay. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2014. V. 57. N 10. P. 77-79 (in Russian).
6. Rudobashta S.P. Mass transfer in solid phase systems. M.: Khimiya. 1980. 248 p. (in Russian).
7. Ovchinnikov L.N. Investigation of process of obtaining complex granulated organo-mineral fertilizers of prolonged action based on peat. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 9. P. 100-104 (in Russian).
8. Mitrofanov A.V., Ogurtsov A.V., Mizonov V.E., Ovchinnikov L.N. Numerical and experimental investigation of heat process in a fluidized bed. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2011. V. 54. N 5. P. 134-136 (in Russian).
9. Vasiliev A.N., Severinov O.V. To calculation of heat and moisture exchange in a dense layer of grain. *Vestn. NGIEI*. 2016. N 4. P. 63-71 (in Russian).
10. Akulich P.E., Dragun V.A., Kuts P.S. Technologies and techniques of drying and heat treatment of materials. Minsk: Belarus. nauka. 2006. 190 p. (in Russian).
11. Mitrofanov A.V., Mizonov E. V., Tannous K. Mathematical model of the evolution of the fluidized bed state in moisture transfer. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2015. V. 58. N 4. P. 75-78 (in Russian).
12. Rudobashta S.P. Mathematical modeling of the process of convective drying of dispersed materials. *Izv. RAN. Energetika*. 2000. N 4. P. 98 (in Russian).
13. Rudobashta, S.P., Kartashov E.M. Diffusion in chemical-technological processes. M.: Kolos S. 2010. 478 p. (in Russian).
14. Sazhin B.S. Basic techniques of drying. M.: Khimiya. 1984. 320 p. (in Russian).

15. **Овчинников Л.Н., Овчинников Н.Л.** Расчётно-экспериментальные исследования получения органоминеральных сорбентов на основе торфа. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2012. Т. 55. Вып. 11. С. 89-92.
16. **Митрофанов А.В., Овчинников Л.Н., Огурцов А.В., Магницкий В.А., Мизонов В.Е.** Расчётно-экспериментальное исследование псевдооживления полидисперсного сыпучего материала. *Изв. вузов. Химия и химическая технология.* 2012. Т. 55. Вып. 8. С. 95-97.
17. **Овчинников Н.Л., Овчинников Л.Н., Мизонов В.Е.** Моделирование поглощения жидкости плавающим на её поверхности пористым цилиндром. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2013. Т. 56. Вып. 4. С. 110-112.
18. **Рудобашта С.П.** Теплотехника. М.: Колос. 2010. 599 с.
19. **Овчинников Л.Н., Козлов М.А.** Эффективный секционированный гранулятор-сушилка КС. *Современ. наукоем. технол.* 2005. № 1. С. 44-49.
20. **Широков С.Г., Овчинников Л.Н., Пелеш А.М.** Новая конструкция промышленного гранулятора с псевдооживленным слоем для получения карбамида и комплексных удобрений на его основе. Сб. тр. МНТК Новые технологии в химической промышленности. Ч. 1. Минск: БГТУ. 2004. С. 239-241.
15. **Ovchinnikov L.N., Ovchinnikov N.L.** Computational and experimental studies of obtaining organomineral sorbents based on peat. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2012. V. 55. N 11. P. 89-92 (in Russian).
16. **Mitrofanov A.V., Ovchinnikov L.N., Ogurtsov A.V., Magnitskiy V.A., Mizonov V.E.** Numerical and experimental investigation of fluidization of polydispersed granular material. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2012. V. 55. N 8. P. 95-97 (in Russian).
17. **Ovchinnikov N.L., Ovchinnikov L.N., Mizonov V.E.** Modeling of liquid absorption by a porous cylinder of Izv floating on its surface higher educational. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2013. V. 56. N 4. P. 110-112 (in Russian).
18. **Rudobashhta S.P.** Heat Engineering. M.: Kolos. 2010. 599 p. (in Russian).
19. **Ovchinnikov L.N., Kozlov M.A.** Effective partitioned dryer-granulator KS. *Sovremen. naukoem. tekhnologii.* 2005. N 1. P. 44-49 (in Russian).
20. **Shirokov S.G., Ovchinnikov L.N., Peles A.M.** New design of industrial pellet mill with fluidized bed for urea and complex fertilizers based on new technologies in the chemical industry. Sat. Tr. IRTC. Part 1. Minsk: BSTU. 2004. P. 239-241.

*Поступила в редакцию 27.06.2018
Принята к опубликованию 03.12.2018*

*Received 27.06.2018
Accepted 03.12.2018*