

К РАСЧЕТУ КИНЕТИКИ СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ ЖИДКИХ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ НА ПОДЛОЖКАХ

А.Н. Пахомов, Н.Ц. Гатапова, Н.В. Орлова, Ю.В. Пахомова

Андрей Николаевич Пахомов *, Наталия Цибиковна Гатапова, Наталия Вячеславовна Орлова, Юлия Владимировна Пахомова

Кафедра Технологических процессов, аппаратов и техносферной безопасности, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, Тамбов, Российская Федерация, 392000

E-mail: pahomov.an@mail.tstu.ru *, postmaster@gnzpri.tstu.ru, vnvpri@mail.ru, puvdom@yandex.ru

Для процесса сушки слоя жидкого дисперсного продукта на горизонтальной подложке предложена модель формирования остатка частиц твердой фазы, основанная на построении фрактального кластера на ограниченной пространственной решетке по заданным правилам. Модель построена исходя из представлений о механизме взаимодействия частиц в период существования в высыхающем продукте свободной жидкости. Фрактальная модель, обладающая свойством самоподобия формирующейся структуры, позволяет моделировать пространственные структуры на ограниченных решетках и распространять данные, полученные на ограниченных решетках, на весь объем моделируемого остатка. В статье приведен краткий обзор основных работ, связанных с применением фрактальной концепции при моделировании микро и макроскопических структур, возникающих при сушке жидких продуктов. Показано, что для расчета кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках, в случае формирования некоторого слоя поверхностной пленки и формирования определенной пространственной структуры из частиц твердой фазы, важной задачей является определение критического влагосодержания. Предложенная модель позволяет моделировать слои с фрактальной размерностью, лежащей в диапазоне от 1,64 до 2. Такой диапазон соответствует слоям в диапазоне пористости от слоев с плотной монодисперсной укладкой частиц с координационным числом 12, до структур подобных дендритным фракталам, с пористостью гораздо выше упорядоченной простой кубической укладки частиц. Представлены результаты моделирования фрактального кластера и сравнения расчетных и экспериментальных значений пористости и критического влагосодержания, полученных в процессе сушки суспензии оптического отбеливателя КД-2 и полиметилена-В-нафталинсульфоната при разных режимах конвективной сушки слоя продукта на фторопластовой горизонтальной подложке, как продуктов, характеризующихся близким значением начальной концентрации твердой фазы ($\approx 12\%$), но разными величинами размеров частиц и полученных значений фрактальной размерности поверхностной пленки и сухого остатка.

Ключевые слова: сушка, кинетика, модель, расчет, слой, фрактал, пленка

ON CALCULATION OF DRYING KINETICS OF THERMOLABILE LIQUID DISPERSED PRODUCTS ON SUBSTRATES

A.N. Pakhomov, N.C. Gatapova, N.V. Orlova, Yu.V. Pakhomova

Andrey N. Pakhomov *, Natalia Ts. Gatapova, Natalia V. Orlova, Yulia V. Pakhomova

Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety, Tambov State Technical University, Sovetskaya st., 106, Tambov, 392000, Russia

E-mail: pahomov.an@mail.tstu.ru *, postmaster@gnzpri.tstu.ru, vnvpri@mail.ru, puvdom@yandex.ru

For the drying process of a liquid dispersed product layer on a horizontal substrate, a model for the formation of a solid phase particle residue is proposed. The model is based on the construction of a fractal cluster on a bounded spatial lattice according to given rules. The model is constructed on the basis of ideas about the mechanism of interaction of particles during the existence of a layer of free liquid in the drying product. The fractal model, which has the property of self-similarity of the forming structure, allows modeling spatial structures on bounded lattices and spreading the data obtained on bounded lattices to the entire volume of the simulated residue. The article provides a brief overview of the main works related to the application of the fractal concept in the modeling of micro and macroscopic structures arising during the drying of liquid products. It is shown that in order to calculate the kinetics of drying liquid dispersed products on substrates, in the case of the formation of a certain layer of surface film and the formation of a certain spatial structure of solid particles, an important task is to determine the critical moisture content. The proposed model allows modeling layers with fractal dimension lying in the range from 1.64 to 2. This range corresponds to layers in the porosity range from layers with dense monodisperse particle stacking with a coordination number of 12, to structures similar to dendrite fractals, with porosity much higher than the ordered simple cubic particle stacking. The results of fractal cluster modeling and comparison of calculated and experimental values of porosity and critical moisture content obtained in the process of drying a suspension of optical bleach CD-2 and polymethylene-B-naphthalene sulfonate under different modes of convective drying of the product layer on a fluoroplastic horizontal substrate as products characterized by a close value of the initial concentration of the solid phase ($\approx 12\%$), but different values of particle sizes and the obtained values of the fractal dimension of the surface film and the dry residue are presented.

Key words: drying, kinetics, model, calculation, layer, fractal, film

Для цитирования:

Пахомов А.Н., Гатапова Н.Ц., Орлова Н.В., Пахомова Ю.В. К расчету кинетики сушки термолабильных жидких дисперсных продуктов на подложках. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 3. С. 100–107

For citation:

Pakhomov A.N., Gatapova N.C., Orlova N.V., Pakhomova Yu.V. On calculation of drying kinetics of thermolabile liquid dispersed products on substrates. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 3. P. 100–107

ВВЕДЕНИЕ

Процессы сушки жидких дисперсных продуктов на сегодняшний день находят широкое промышленное применение, особенно это касается продуктов органического синтеза (например, сушка красителей, отбеливателей, пластификаторов и т.п.), обезвоживание которых необходимо производить в жидком виде [1, 2]. Основными направлениями модернизации аппаратно-технологического оформления стадии сушки жидких дисперсных продуктов являются поиск путей энерго-ресурсосбережения, интенсификации процесса сушки, получение сухого продукта высокого качества [3, 4]. Необходимо отметить, что большинство промышленных высушиваемых жидких дисперсных продуктов являются термолабильными, в процессе сушки которых наблюдаются определенные поверхностные явления, в частности формирование поверхностных пленок, определенным образом влияющих на характер формирования

твердого остатка, что накладывает определенные ограничения на ведение технологического процесса и на методику проведения экспериментальных исследований.

Одним из основных направлений исследований в области сушки жидких дисперсных продуктов является формализация взаимосвязи наблюдающихся при сушке жидких дисперсных продуктов, поверхностных явлений, с кинетикой процесса сушки, а также установление связи этих явлений с качественными характеристиками готового продукта. Выявление таких взаимосвязей дает возможность моделирования процесса формирования поверхностных и объемных структур и собственно кинетики сушки [3, 5, 6, 7].

Например, в работе [5] проведено изучение закономерностей формирования поверхностных структур при сушке капель водных растворов цетилтриметиламмоний бромида с использованием поляризационной оптической микроскопии. Выявлено формирование определенных дендритных

структур и показано влияние свойств дисперсной системы на вид поверхностной структуры. В работе [6] приводятся данные о возможности получения различных видов поверхностных структур, получающихся при сушке коллоидного геля крахмала с добавлением определенного количества раствора NaCl. Показано, что детали морфологии поверхности зависят от свойств жидкой и твердой фазы и внешних условий – температуры и влажности сушильного агента. В работе [7] проведено исследование механизма сушки сидячих капель мицеллярной наножидкости двух различных ионных поверхностно-активных веществ (цетилтриметиламмоний бромида и додецилсульфат натрия). Показано влияние закрепления контактной линии на характер формирования поверхностных и объемных структур в высыхающем продукте.

Важными вопросами при моделировании кинетики сушки жидких дисперсных продуктов являются расчет характеристик внешнего тепло-массообмена и внутреннего тепло-массопереноса [8, 12], определение характера взаимодействия удаляемого с поверхности испарения пара со средой сушильного агента [9], учет характера движения и взаимодействия отдельных капель высушиваемого продукта [10], разработка методов расчета температурной и влажностной кинетики при формировании в процессе сушки поверхностных структур [11, 13, 14].

Традиционно, при компьютерном моделировании поверхностных структур, возникающих в жидких дисперсных системах, используются методы броуновской и стоковской динамики [15, 16]. Однако, использование данных методов для моделирования поверхностных структур при сушке затруднительно, в связи с нестационарностью температурного поля и изменением границ продукта в процессе сушки [14-16].

Одним из перспективных направлений в области моделирования поверхностных структур, формирующихся при сушке жидких дисперсных продуктов, является применение элементов фрактальной математики [17-21]. Основными достоинствами фрактального подхода являются вытекающие из положения о самоподобии формирующейся структуры возможности моделирования пространственных структур на ограниченных решетках, применение оценочных значений определенных модельных параметров и соответственно возможность распространения данных, полученных на ограниченных решетках, на весь объем моделируемой структуры [17, 21].

Например, в работе [17] показано применение фрактальной концепции при моделировании микро и макроскопической структуры материала при сушке капиллярно-пористых сред. В работах [18, 20] проведено исследование фрактальной структуры гранул различных размеров, полученных распылительной сушкой водных дисперсий микрокристаллической целлюлозы. В работе [19] показано, что многослойная фрактальная теория Брунауэра-Эммета-Теллера может быть использована в качестве инструмента для получения информации о распределении жидкой фазы при сушке частиц целлюлозного порошка различной кристалличности.

Так как при сушке большинства исследованных жидких дисперсных продуктов основная масса влаги удаляется в первом периоде, определенный интерес вызывает влияние на кинетику сушки характера формирования пространственной структуры, состоящей из частиц твердой фазы, в период наличия в продукте свободной влаги и относительной подвижности частиц, связанной с размерами частиц, свойствами жидкой фазы, наличием и характером внутренних течений в высыхающем продукте [2, 4, 13, 14].

МЕТОД РАСЧЕТА И ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Традиционно, кинетика сушки моделируется отдельно для I и II периодов [9, 11, 14, 22]. Оценку границ периодов, как правило, производят по величине $u_{кр}$ – критического влагосодержания. Существует ряд общепринятых оценок $u_{кр}$ (например, по А.В. Лыкову для капиллярно-пористых тел $u_{кр} = 0,56 \cdot u_0$). Для расчета $u_{кр}$ при сушке жидких дисперсных продуктов на подложках авторами [22] предложена формула:

$$u_{кр} = K_{\phi} \cdot \frac{\rho_{ж}}{\rho_{ск}} \cdot \frac{\Pi}{1 - \Pi} \cdot \frac{\mu(T)}{\mu_0}, \quad (1)$$

где K_{ϕ} – коэффициент формы частиц твердой фазы, $\rho_{ск}$ – плотность скелета (монокита твердой фазы), $\rho_{ж}$ – плотность жидкой фазы, Π – пористость твердого остатка, μ_0 – базовая вязкость жидкой фазы при $T = 20$ °С, $\mu(T)$ – вязкость жидкой фазы при температуре T .

Однако, при сушке жидких дисперсных продуктов, при наличии поверхностных явлений, существующие оценки $u_{кр}$ дают удовлетворительные результаты только для методик инженерного расчета. Корректное определение входящей в формулу (1) величины пористости твердого остатка для высушенных жидких термолабильных продуктов, проявляющих эффекты структурообразования, не всегда возможно, а приближенные оценки

по координационному числу упорядоченной укладки частиц в слое не дают приемлемых по точности результатов.

В случае, если при сушке на подложке жидкого дисперсного продукта наблюдается формирование некоторого слоя поверхностной пленки, то этот слой сокращает поверхность испарения, что отражается на виде кинетических кривых (в частности отмечается характерное изменение термограммы в районе площадки мокрого термометра). Поэтому важной задачей является определение критического влагосодержания для сушки жидких дисперсных продуктов при наличии поверхностных явлений.

В работе авторов [21] на основании экспериментально определенной величины фрактальной размерности поверхностной структуры предлагается фрактальная модель поверхностной пленки, формирующейся при сушке жидких дисперсных продуктов на твердых подложках. Моделирование поверхностной структуры осуществляется построением фрактального кластера, формирующегося на основе алгоритма диффузионно-контролируемой агрегации с учетом случайного появления новых частиц в границах контактной линии и расчетом кинетики формирования моделируемой поверхности. Используя полученные в модели поверхностной структуры [21] значения коэффициента сокращения поверхности, получаем возможность уточненного расчета поверхности испарения и соответственно величин коэффициентов тепло-массообмена, интенсивности испарения и температуры площадки мокрого термометра.

Исходя из представлений о механизме формирования слоя сухого продукта, можно предположить, что слой свободной жидкости в высыхающем продукте существует до момента прекращения подвижности твердых частиц. Для математического описания этого процесса наиболее удобно представить высыхающий продукт в виде определенного двумерного слоя, а формирующиеся структуры характеризовать определенной величиной пористости. Предполагаем, что формирование слоя твердых частиц в первом периоде сушки, при наличии поверхностной пленки, имеет фрактальный характер. Т.о. первый период сушки существует до достижения слоем частиц, формирующих твердый остаток, определенной фрактальной размерности d_f . При достижении слоем заданной фрактальной размерности слой высыхающей жидкости переходит в слой влажного остатка и начинается второй период сушки. При этом появляется

возможность расчета толщины сформировавшегося слоя, его пористости и величины критического влагосодержания.

Таким образом, метод расчета кинетики сушки [14, 22] дополняется фрактальной моделью построения поверхностной пленки, формирующейся в процессе сушки [21] и описанного выше предположения о фрактальном характере формирования высыхающего слоя продукта, что дает возможность корректной оценки критического влагосодержания по характеристикам твердой фазы и характеру формирования остатка.

Моделирование высыхающего слоя продукта осуществим на основе модели фрактального кластера. Построение фрактального кластера осуществляем по следующим правилам:

1. Построение кластера осуществляем на пространственной двумерной решетке 100×100 .

2. Затравка для построения кластера располагается по верхней стороне решетки. Координата затравки по оси $y = 1$. Данные для построения затравки берем из результатов построения поверхностной пленки по модели [21]. При этом данные с плоскости переводим в линию путем сечения плоскости посередине. В результате в качестве затравки получаем геометрическое место точек (линию), состоящее из N_z частиц и $(100 - N_z)$ пустот.

3. Новая частица генерируется внутри решетки по следующему алгоритму:

а) координата новой частицы по оси x выбирается случайным образом в диапазоне от 1 до 100;

б) в начальный момент времени координату y_0 новой частицы по оси y принимаем равной $10 \cdot d$ (d – условный размер, для построения кластера на решетке $d = 1$; т.к. в решетке каждый узел это частица или пустота, то $y_0 = 10$);

в) далее, начинается построение кластера по правилу 4. При этом рассчитываем количество частиц, формирующих новый горизонтальный слой кластера. При достижении количества частиц в новом слое равном N_z , изменяем координату генерации новой частицы по оси y на величину Δy :

$$y_n = y_t + \Delta y, \quad (2)$$

где y_t – значение координаты y для генерации новой частицы, на текущей итерации построения кластера, y_n – новое значение координаты y для генерации новой частицы на следующей итерации.

4. Частица после генерации внутри решетки движется хаотически до момента соприкосновения с кластером. Принимаем вероятность слияния частицы с кластером равной 1.

5. Построение кластера осуществляем до достижения заданной фрактальной размерности слоя d_f^c .

По окончании построения кластера определяем пористость кластера (как отношение числа узлов построенного кластера, не занятого частицами, к общему числу узлов в построенном кластере), которая, исходя из свойства самоподобия, будет равна пористости слоя Π , и рассчитываем величину полученного критического влагосодержания $u_{кр}$ по классической формуле:

$$u_{кр} = \frac{\rho_{ж}}{\rho_{ск}} \cdot \frac{\Pi}{1 - \Pi}, \quad (3)$$

где $\rho_{ск}$ – плотность скелета (монолита твердой фазы), $\rho_{ж}$ – плотность жидкой фазы.

Схема метода расчета кинетики сушки в первом периоде с учетом фрактальной модели поверхности и фрактальной модели формирования твердого слоя представлена на рис. 1.

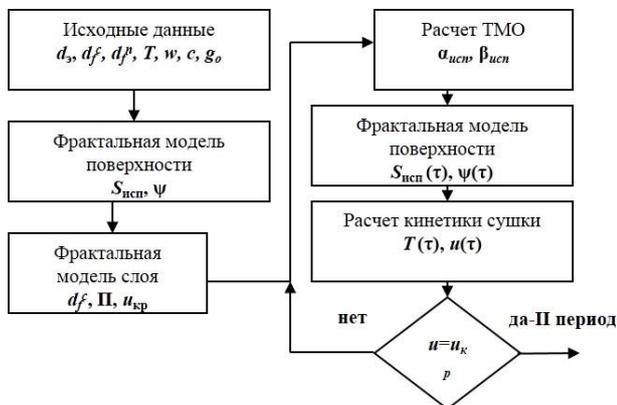


Рис. 1. Схема метода расчета кинетики сушки в первом периоде: d_3 – эквивалентный диаметр частицы, d_f^c – фрактальная размерность слоя на срезе, d_f^n – фрактальная размерность поверхности; режимные параметры: T – температура сушильного агента, w – скорость сушильного агента; c – концентрация твердой фазы, g_0 – начальная навеска, $S_{исп}$ – площадь испарения, ψ – коэффициент, учитывающий уменьшение интенсивности испарения с поверхности, Π – пористость слоя, u – текущее влагосодержание, $u_{кр}$ – критическое влагосодержание, $\alpha_{исп}$ – коэффициент теплоотдачи при испарении, $\beta_{исп}$ – коэффициент массоотдачи при испарении

Fig. 1. Scheme of calculation method of drying kinetics in the first period: d_3 - equivalent particle diameter, d_f^c - fractal dimension of the layer on the cut, d_f^n - fractal dimension of the surface; operating parameters: T - temperature of drying agent, w is the rate of the drying agent; c is the concentration of the solid phase, g_0 - the initial charge, $S_{исп}$ - the evaporation surface, ψ - coefficient taking into account the decrease in the intensity of evaporation from the surface, Π is the porosity of the layer, u - the current moisture content, $u_{кр}$ - critical moisture content, $\alpha_{исп}$ - the coefficient of heat transfer by evaporation, $\beta_{исп}$ - factor of mass transfer by evaporation

Расчет величин коэффициентов внешней тепло-массоотдачи и температуры мокрого термометра ведем по известным зависимостям [22]. Температурная и влажностная кинетика в первом пери-

оде рассчитывается с учетом стока тепла на испарение, зависящего от величины поверхности испарения, которую корректируем по величине коэффициента сокращения поверхности, получаемого по модели [21]. По достижении $u_{кр}$ переходим к расчету II периода сушки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как следует из анализа результатов моделирования слоя частиц, величина Δn влияет на характер упаковки частиц в слое, получаемую величину пористости слоя Π , и связана с величиной фрактальной размерности полученного кластера d_f . Значения Δn могут меняться в диапазоне от 1 до 10. При $\Delta n = 1$ получаем плотную упаковку частиц с размерностью 2, т.е. фрактальный кластер переходит в упорядоченный. При $\Delta n = 10$ получаем максимально пористую структуру, по характеру повторяющую дендритные фракталы с размерностью $1,65 \pm 0,05$ полученные по модели частица-кластер Виттена-Сандера.

На рис. 2 представлена полученная в результате моделирования фрактального кластера зависимость получаемой фрактальной размерности кластера d_f от величины Δn .

Исходя из полученных данных, в разработанной модели можно рекомендовать следующую формулу для взаимосвязи d_f и Δn .

$$d_f = 2,04 - 0,04 \cdot \Delta n. \quad (4)$$

На рис. 3 представлен вид полученного кластера на решетке 100×100 для фрактальной размерности 1,88 и 1,76, наблюдаемой при сушке полиметилена-В-нафталинсульфонатов при разных режимах сушки. Фрактальная размерность слоя определялась путем графического анализа фотографий срезов высушенных продуктов.

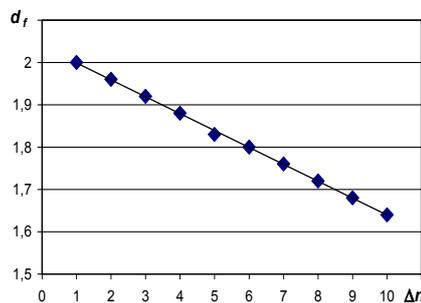


Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности от величины Δn
Fig. 2. Dependence of fractal dimension on the value Δn

Характерной особенностью полученных кластеров является примерно одинаковое количество частиц, формирующих кластер заданной фрактальной размерности на выбранной пространственной решетке.

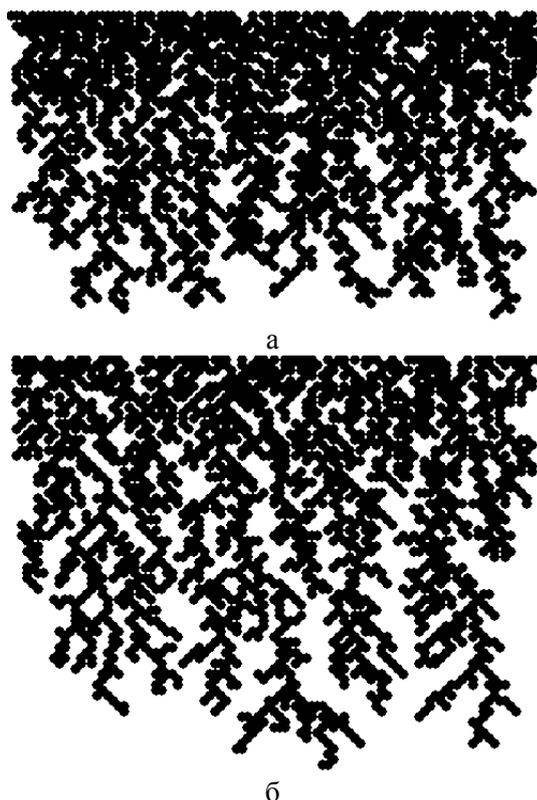


Рис. 3. Вид фрактального кластера, полученного по предлагаемой модели формирования твердого остатка. Решетка 100x100. а – $d_f = 1,88$, $\Pi = 0,637$, N частиц в кластере = 2067; б – $d_f = 1,76$, $\Pi = 0,732$, N частиц в кластере = 2061
 Fig. 3. The form of fractal cluster, obtained by the proposed models for the formation of the solid residue. Grid 100x100. a – $d_f = 1,88$, $\Pi = 0,637$, N particles in the cluster = 2067; b – $d_f = 1,76$, $\Pi = 0,732$, N particles in the cluster = 2061

В табл. 1 приведены полученные в результате моделирования фрактального кластера значения пористости, экспериментально определенной фрактальной размерности слоя, рассчитанной и экспериментально полученной величины критического влагосодержания, при сушке суспензии оптического отбеливателя КД-2 и полиметилена-В-нафталинсульфоната при разных режимах конвективной сушки продукта на фторопластовой горизонтальной подложке. Выбранные продукты характеризуются близким значением начальной концентрации твердой фазы ($\approx 12\%$), но разными величинами размеров частиц и полученными значениями фрактальной размерности поверхностной пленки и сухого остатка. При этом при сушке оптического отбеливателя КД-2 практически не наблюдается формирования поверхностной пленки, а полиметилена-В-нафталинсульфоната на всех режимах сушки формирует характерные поверхностные структуры.

Таблица 1

Сравнение расчетных и экспериментальных данных по критическому влагосодержанию
 Table 1. Comparison of calculated and experimental data on critical moisture content

Продукт	Режим сушки, Т/w	d_f	Π	$u_{кр}^{эксп}$	$u_{кр}^{расч}$
КД-2	80/5	2	0,26	0,078	0,087
КД-2	140/5	1,92	0,57	0,31	0,331
полиметилена-В-нафталинсульфоната	80/5	1,88	0,637	0,3	0,325
полиметилена-В-нафталинсульфоната	120/5	1,76	0,732	0,45	0,467

ВЫВОДЫ

Как видно из результатов построения фрактального кластера, моделирующего слой твердого остатка, фрактальная размерность кластера является функцией параметра модели Δn и лежит в диапазоне от 1,64 до 2. Значение фрактальной размерности 1,64 соответствует дендритному фракталу, построенному по модели частица-кластер Виттена-Сандера. Пористость подобной структуры около 0,78, что гораздо выше упорядоченной простой кубической укладки частиц, для которой $\Pi \approx 0,47$. Для кластера с фрактальной размерностью 2 получаем величину пористости 0,26, что соответствует плотной монодисперсной укладке частиц с координационным числом 12. Результат расчета критического влагосодержания показывает, что для продукта, не формирующего в процессе сушки поверхностной пленки (отбеливатель КД-2), величина фрактальной размерности около 2. Для подобных продуктов переход к более жесткому режиму сушки приводит к некоторому уменьшению фрактальной размерности и, как следствие, повышению величины критического влагосодержания, что подтверждается экспериментально. Для продуктов, активно проявляющих при сушке эффекты поверхностного структурообразования (полиметилена-В-нафталинсульфоната), величина фрактальной размерности слоя лежит в диапазоне от 1,76 (примерно равна фрактальной размерности поверхности) до 1,88. При этом также наблюдается влияние режима сушки на величину фрактальной размерности и пористости формирующегося слоя. Необходимо отметить, что для полиметилена-В-нафталинсульфоната, как продукта, ярко проявляющего эффекты поверхностного структурообразования, погрешность определения критического влагосодер-

жания с использованием предлагаемой модели построения фрактального кластера равна 3-7%, что гораздо ниже, чем для оптического отбеливателя КД-2 (погрешность 6-12%), как продукта, практически не проявляющего эффекты поверхностного структурообразования, в диапазоне исследованных режимов сушки и свойств высушиваемых продук-

тов. Таким образом, предлагаемая фрактальная модель построения слоя частиц формирующих твердый остаток при сушке жидких дисперсных продуктов на подложках позволяет моделировать слои частиц твердого остатка любой пористости, с получением уточненных значений величины критического влагосодержания.

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

1. **Evans R., Stewart M., Wilding N.** Critical drying of liquids. *Phys. Rev. Lett.* 2016. 117. DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.176102.
2. **Routh A.F.** Drying of thin colloidal films. *Rep. Prog. Phys.* 2013. V. 76. N 4. P. 046603. DOI: 10.1088/0034-4885/76/4/046603.
3. **Miyamoto-Shinohara Yukie, Nozawa Fumie, Sukenobe Junji, Imaizumi Takashi.** Survival of yeasts stored after freeze-drying or liquid-drying. *J. Gen. Appl. Microbiol.* 2010. 56. 107-19. DOI: 10.2323/jgam.56.107.
4. **Wu Mengmeng, Di Yana, Man Xingkun, Doi Masao.** Drying droplets with soluble surfactant. *Langmuir.* 2019. V. 35. N 45. P. 14734-14741. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b02229.
5. **Biswajit Roy, Sanat Karmakar, Abhra Giri, Sujata Tarafdar.** Pattern formation of drying lyotropic liquid crystalline droplet. *RSC Adv.* 2016. 6. P. 112695. DOI: 10.1039/c6ra22579a.
6. **Choudhury Moutushi, Dutta Tapati, Tarafdar Sujata.** Pattern formation in droplets of starch gels containing NaCl dried on different surfaces. *Colloid. Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2013. 432. P. 110-118. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2013.04.064.
7. **Jadav Mudra, Nair Nishant, Patel Rajesh, Jani Snehal.** Investigation of drying mechanism in evaporating micellar nanofluid drops. *J. Nanofluids.* 2016. 5. P. 216-219. DOI: 10.1166/jon.2016.1216.
8. **Borodulin V.Y., Letushko V.N., Nizovtsev M.I., Sterlyagov A.N.** Determination of parameters of heat and mass transfer in evaporating drops. *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2017. V. 109. P. 609-618. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.042.
9. **Левашов В.Ю., Крюков А.П.** Численное моделирование испарения капли воды в парогазовую среду. *Коллоид. журн.* 2017. Т. 79. № 5. С. 606-612. DOI: 10.7868/S002329121705010X.
10. **Mezhericher M., Levy A., Borde I.** Three-dimensional spray-drying model based on comprehensive formulation of drying kinetics. *Drying Technol.* 2012. V. 30. N 11-12. P. 1256-1273. DOI: 10.1080/07373937.2012.686136.
11. **Ioan Cristian Trelea, Fernanda Fonseca, Stéphanie Passet.** Dynamic modeling of the secondary drying stage of freeze drying reveals distinct desorption kinetics for bound water. *Drying Technol.* 2016. V. 34. N 3. P. 335-345. DOI: 10.1080/07373937.2015.1054509.
12. **Fedoseev A.V., Demin N.A., Salnikov M.V., Sukhinin G.I.** Numerical modelling of heat and moisture transfer in a clay-like porous material. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 1105. P. 012048. DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012048.
13. **Brereton G.J.** A discrete multicomponent temperature-dependent model for the evaporation of spherical droplets. *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2013. V. 60. P. 512-522. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.037.

14. **Пахомов А.Н., Гагапова Н.Ц., Пахомова Ю.В.** К расчету кинетики нагрева и сушки многослойных дисперсных продуктов на подложках. *Вестн. ТГТУ*. 2015. Т. 21. № 2. С. 279 – 288. DOI: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.279-288.
15. **Кучин И.В., Урьев Н.Б.** Моделирование динамики дисперсных систем при наличии структурно-механического барьера в результате адсорбции поверхностно-активных веществ. *Коллоид. журн.* 2017. Т. 79. № 4. С. 438–448. DOI: 10.7868/S0023291217040073
16. **Кучин И.В., Урьев Н.Б.** Моделирование структурно-механических характеристик дисперсных систем в условиях динамических воздействий. *Коллоид. журн.* 2013. Т. 75. № 5. С. 596–610. DOI: 10.7868/S0023291213050054.
17. **Xu Peng, Mujumdar Arun S., Yu Boming.** Fractal theory on drying: a review. *Drying Technol.* 2008. 26. 6. P. 640-650. DOI: 10.1080/07373930802045932.
18. **Ioelovich M.** Fractal structure of microcrystalline cellulose obtained by method of spray drying. *Acad. J. Polymer Sci.* 2018. 2(2). P. 555583. DOI: 10.19080/AJOP.2018.02.555583.
19. **Strømme M., Mıhranyan A., Ek R., Niklasson G.** Fractal dimension of cellulose powders analyzed by multilayer bet adsorption of water and nitrogen. *J. Phys. Chem. B.* 2003. 107. 51. P. 14378-14382. DOI: 10.1021/jp034117w.
20. **Ioelovich M.** Study of fractal dimensions of microcrystalline cellulose obtained by the spray-drying method. *Fractal Fract.* 2019. 3(1). P. 3-5. DOI: 10.3390/fractalfract3010003.
21. **Pakhomov A.N., Gatapova N.Ts.** Fractal model of the surface film formed in the process of drying of liquid disperse products on substrates. *J. Eng. Phys. Thermophy.* 2019. 92(2). P. 424-431. DOI: 10.1007/s10891-019-01947-1.
22. **Пахомов А.Н., Гагапова Н.Ц., Пахомова Ю.В.** Моделирование и расчет кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках. Тамбов.: Изд-во ТГТУ. 2016. 160 с.
14. **Pakhomov A.N., Gatapova N.C., Pakhomova Yu.V.** To calculation of kinetics of heating and drying of multilayer dispersed products on substrates. *Vestn. TGTU.* 2015. V. 21. N 2. P. 279 – 288 (in Russian). DOI: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.279-288.
15. **Kuchin I.V., Uriev N.B.** Modeling of dynamics of disperse systems in the presence of structural-mechanical barrier as a result of adsorption of surfactants. *Kolloid. Zhurn.* 2017. V. 79. N 4. P. 438–448 (in Russian). DOI: 10.7868/S0023291217040073.
16. **Kuchin I.V., Uriev N.B.** Modeling of structural and mechanical characteristics of dispersed systems under dynamic influences. *Kolloid. Zhurn.* 2013. V. 75. N 5. P. 596–610 (in Russian). DOI: 10.7868/S0023291213050054.
17. **Xu Peng, Mujumdar Arun S., Yu Boming.** Fractal theory on drying: a review. *Drying Technol.* 2008. 26. 6. P. 640-650. DOI: 10.1080/07373930802045932.
18. **Ioelovich M.** Fractal structure of microcrystalline cellulose obtained by method of spray drying. *Acad. J. Polymer Sci.* 2018. 2(2). P. 555583. DOI: 10.19080/AJOP.2018.02.555583.
19. **Strømme M., Mıhranyan A., Ek R., Niklasson G.** Fractal dimension of cellulose powders analyzed by multilayer bet adsorption of water and nitrogen. *J. Phys. Chem. B.* 2003. 107. 51. P. 14378-14382. DOI: 10.1021/jp034117w.
20. **Ioelovich M.** Study of fractal dimensions of microcrystalline cellulose obtained by the spray-drying method. *Fractal Fract.* 2019. 3(1). P. 3-5. DOI: 10.3390/fractalfract3010003.
21. **Pakhomov A.N., Gatapova N.Ts.** Fractal model of the surface film formed in the process of drying of liquid disperse products on substrates. *J. Eng. Phys. Thermophy.* 2019. 92(2). P. 424-431. DOI: 10.1007/s10891-019-01947-1.
22. **Pakhomov A.N., Gatapova N.C., Pakhomova Yu.V.** Modeling and calculation of drying kinetics of liquid dispersed products on substrates. Тамбов.: Изд-во ТГТУ. 2016. 160 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 21.11.2019
Принята к опубликованию 13.01.2020

Received 21.11.2019
Accepted 13.01.2020