УДК 664.001.5:664.046.1

И.Ю. Алексанян, Л.М. Титова, А.Х.-Х. Нугманов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Для разработки рациональных конструкций агрегатов и оптимальных режимов сушки необходимо знать кинетические закономерности процесса и условия его моделирования. Используя два подхода при моделировании, была получена статистическая модель и модель в обобщенных координатах процесса сушки дисперсного материала в кипящем слое. Указаны преимущества и недостатки, а также области применения разработанных моделей. Первая модель разработана с помощью полуэмпирического зонального метода расчета и справедлива для математического описания кинетики процесса сушки исследуемого объекта. Модель является более точной, при этом количество значащих цифр в полученном уравнении обусловлено необходимой точностью аппроксимации экспериментальных данных. Но конечный результат расчета с ее использованием в предельно возможной форме индивидуализирован. Математическая модель в обобщенных координатах разработана для возможности распространения результатов исследований кинетики сушки на подобные материалы с учетом инвариантности критериев и симплексов подобия. Она может быть использована при проектировании рациональных сушильных установок кипящего слоя для перехода от лабораторных масштабов к промышленным с достаточной степенью надежности. В этом случае окончательный переход к данным, относящемся к единичному конкретному процессу, совершается на последней стадии исследования и сводится к подстановке численных значений параметров в критериальное уравнение. Обобщенное уравнение является более рациональной формой представления результатов, чем эмпирические уравнения. Но из-за большой сложности процессов тепломассообмена абсолютно доминирующее значение получают методы, в которых задачи ставятся в конкретно числовой форме. Общность модели по-прежнему остается одной из основных проблем в связи с отсутствием фундаментальных данных. Конструкция, эксплуатация и оптимизация промышленных сушилок требуют всеобъемлющей математической модели, которая синтезирует в себе точность, общность и простоту.

Сушильная установка, кипящий слой, кинетика обезвоживания, математическая модель.

Введение

Сушка является зачастую заключительным этапом производства и характеризуется значительной энергоемкостью. В современных условиях возрастающего потребления энергии, с одной стороны, и дефицита энергетических ресурсов – с другой, все более остро ставятся вопросы энергосбережения. Несмотря на сформировавшиеся принципы энергосбережения в технологии и технике сушки, нет однозначного решения их реализации, поэтому проблема решения задач экономии энергии при получении сухих пищевых волокон является актуальной и формирует цель дополнительных исследований.

Сушка является нестационарным термодиффузионным процессом, в котором в общем случае влагосодержание и температура материала непрерывно изменяются во времени, поэтому для разработки рациональных конструкций агрегатов и оптимальных режимов влагоудаления необходимо знать кинетические закономерности процесса и условия его моделирования.

Методы описания кинетики процесса сушки можно разделить на три группы: теоретические (математические) – аналитические и численные, основанные на решениях дифференциальных уравнений переноса; полуэмпирические, основой которых также служат те или иные фундаментальные уравнения тепломассообмена, но для решения используются различные упрощения; эмпирические.

В качестве примеров наиболее широко освещенных в литературе полуэмпирических методов расчета можно отметить уравнение Г.К. Филоненко для приведенной скорости сушки [1]; зональный метод А.В. Лыкова и развитие метода В.В. Красниковым [2]; способ расчета кинетики сушки дисперсных материалов с разнопористой структурой на основе комплексного анализа дисперсных, сорбционно-структурных и тепловых характеристик [3]; построение и использование обобщенных кривых скорости сушки в координатах ($N \cdot \tau$-τ), где N – скорость сушки в первый период или максимальная скорость сушки в начале второго периода, τ – продолжительность сушки [4].

Поскольку решение дифференциальных уравнений тепломассопроводности ввиду их нелинейности представляет определенные математические трудности, на практике чаще всего используются различные полуэмпирические методы.

С помощью опытных кривых сушки можно привести систему дифференциальных уравнений тепломассопереноса либо к уравнению массопроводности, либо к уравнению теплопроводности и строить дальнейшее математическое описание на их основе [5]. Наиболее эффективно использование методов

кинетического расчета с помощью опытных кривых сушки в том случае, когда их получают для дифференциально малого объема аппарата [6], т.к. последующий анализ с учетом гидродинамики потоков, решения уравнений материального и теплового баланса позволяет получить достоверное описание кинетики и динамики сушки для всего аппарата в целом и обоснованно решать задачу перехода от результатов лабораторных исследований к промышленным сушильным установкам.

Объект и методы исследования

Объектом исследования является высоковлажный дисперсный материал – жом, полученный в процессе переработки тыквы в технологии пектина и пектиновых концентратов. Согласно ей, тыква последовательно проходит следующие стадии обработки: приемка, мойка и инспекция, дробление с отделением семян, прессование, при которых происходит разделение на пектиновую пульпу, жом и пектиносодержащий сок, смешивание жома с высокоочищенной водой, ферментирование и кавитационная обработка в экстракторе-дезинтеграторе, вакуум-фильтрование и сепарирование пульпы с отделением выжимок. Последние по составу представляют собой грубую клетчатку (целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин) с незначительным содержанием водорастворимого и протопектинов. Жом пищевых волокон представляет собой микростружку с определенной степенью полидисперсности и может быть отнесен к классу грубодисперсных систем, характеризующемуся большими размерами частиц ($>10^{-5}$ м) и незначительной дисперсностью. По классификации А.В. Лыкова изучаемый объект сушки можно отнести к группе капиллярно-пористых коллоидных тел, в которых для жидкости характерны различные формы связи влаги с твердым скелетом, присущие как капиллярно-пористым, так и коллоидным телам.

При выборе режима сушки и рациональной конструкции аппарата в первую очередь следует обеспечить условия, необходимые для получения требуемых технологических свойств высушиваемого продукта. При сушке растительного сырья в неподвижном слое верхним пределом нагревания сушильного воздуха является температура 60–80 °С [1]. Применение более высоких температур приводит к ухудшению технологических показателей вследствие неравномерного нагревания материала и подгорания продукта. Экспериментальные исследования процесса сушки в развитой стадии псевдоожиженного слоя подтвердили возможность применения повышенных температур 140–150 °С нагретого воздуха для сушки пищевых волокон. При сушке в кипящем слое интенсивное перемешивание частиц в вихревом потоке воздуха выравнивает температуру нагретого воздуха и частиц, исключая местные перегревы материала. Кроме этого, значительное сокращение продолжительности сушки при применении высоких температур уменьшает суммарное воздействие тепла на материал. Высушенные частицы сохраняют свою форму и объем и имеют пористую структуру, что улучшает их восстанавливаемость. Это объясняется малой усадкой при сушке в кипящем слое с температурным режимом выше 100 °С, так как в этом случае влага внутри частиц перемещается только в виде пара, внутреннее давление которого уравновешивает силы, вызывающие усадку материала [1]. Для обоснования рациональности того или иного способа сушки важны не только вид и свойства исходного сырья, вид удаляемой из материала влаги, начальное и конечное влагосодержание, плотность, но и сведения об изменениях формы и состояния, которые материал может претерпевать при сушке, производительность установки и т.д. Жом пищевых волокон в процессе сушки проявляет сильно выраженные адгезионные свойства, при большой влажности склонен к образованию агломератов и налипанию на стенки сушильной камеры. По мере высыхания в активном гидродинамическом режиме крупные агломерированные частицы жома распадаются, отдельные частицы пищевых волокон с подсушенным поверхностным слоем при ожижении образуют достаточно гидродинамически устойчивый кипящий слой.

Таким образом, доказана экспериментально рациональность сушки жома в псевдоожиженном слое с точки зрения получения высокого качества готового продукта, снижения энергоемкости процесса и простоте конструктивного исполнения сушильного аппарата.

Ранее была изучена кинетика процесса обезвоживания в кипящем слое высоковлажного дисперсного материала с эквивалентным диаметром частиц 1,7 мм [7], с использованием вероятностно-статистических методов планирования и обработки экспериментальных данных по полному многоуровневому многофакторному плану.

Целью работы является построение математических моделей процесса сушки указанного объекта обработки. Как следует из сказанного выше, в современной теории математического моделирования наблюдается две тенденции – стремление к полноте и детальности получаемых результатов, с одной стороны, и их универсальности – с другой. Потому с целью приблизить постановку задачи к реальным условиям изучаемого процесса в круг исследования были включены величины, посредством которых определяется влияние на ход процесса индивидуальных условий его развития, которые являются постоянными параметрами задачи (влияющие факторы). Для каждого конкретного случая они получают определенные фиксированные значения, но изменяются при переходе от одного эксперимента к другому.

Целевой функцией являлась производительность аппарата по сухому продукту единицы объема сушильной камеры в единицу времени:

$$П = \frac{M_c}{\tau_c \cdot A},$$

где M_c – масса высушенного продукта, кг; τ_c – время сушки, час; A – объем рабочей камеры, м^3.

Значение целевой функции определялось следующими факторами: начальная концентрация сухих веществ продукта $c_н$ (кг влаги/кг сухих

веществ), температура T (К) и скорость V (м/с) сушильного агента. Границы варьирования факторов выбраны, исходя из технологических ограничений, и обоснованы экспериментально: T = 383–423 К (110–150 °С); $c_н$ = 0,07–0,25 кг/кг; V = 10,8–12,8 м/с.

Компьютерная обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с использованием математического пакета Mathcad и программы для работы с электронными таблицами Excel.

В результате обработки опытных данных получена расчетная зависимость для определения производительности сушильной установки в условиях варьирования влияющих на интенсивность протекания процесса факторов:

$$\begin{gathered}
П(c_н,V,T)=\left(0{,}002\cdot T^2-1{,}250\cdot T+241{,}020\right)\cdot V^2+\\
+\left(-0{,}037\cdot T^2+28{,}581\cdot T-5505{,}841\right)\cdot V+\\
+0{,}209\cdot T^2-162{,}014\cdot T+31190{,}759\\
[\left(0{,}002\cdot T^2-1{,}250\cdot T+241{,}020\right)\cdot V^2+\\
+\left(-0{,}037\cdot T^2+28{,}581\cdot T-5505{,}841\right)\cdot V+\\
+0{,}209\cdot T^2-162{,}014\cdot T+31190{,}759]\cdot(1-c_н)^2+\\
[\left(-0{,}003\cdot T^2+2{,}173\cdot T-418{,}708\right)\cdot V^2+\\
+\left(0{,}064\cdot T^2-49{,}595\cdot T+9550{,}555\right)\cdot V-\\
-0{,}036\cdot T^2+280{,}838\cdot T-54046{,}847]\cdot(1-c_н)+\\
\left(0{,}001\cdot T^2-0{,}938\cdot T+180{,}690\right)\cdot V^2+\\
+\left(-0{,}028\cdot T^2+21{,}381\cdot T-4115{,}582\right)\cdot V+\\
+0{,}156\cdot T^2-120{,}931\cdot T+23262{,}764.
\end{gathered}$$

Уравнение можно использовать в расчетах кинетики сушильных процессов в кипящем слое, но при этом необходимо учитывать гидродинамику потоков газовзвеси дисперсного материала. Гидродинамическими характеристиками кипящего слоя являются ε_0, ε – порозность неподвижного и взвешенного слоев соответственно и коэффициент расширения слоя k, которые определяются экспериментально для каждого продукта. При этом $k=\dfrac{1-\varepsilon_0}{1-\varepsilon}$. Величина производительности сушильной установки с учетом расширения слоя при обезвоживании в развитой стадии кипящего слоя $П'$ определится в общем виде выражением:

$$П'\left(c_н,V,T\right)=\frac{П(c_н,V,T)}{k}. \qquad (1)$$

Для возможности расчета производительности сушилки кипящего слоя по формуле (1) для исследуемого продукта проведено экспериментальное исследование гидродинамических параметров ожижения слоя пищевых волокон на экспериментальной установке при продувании слоя восходящим потоком воздуха.

Экспериментально установлено, что порозность неподвижного слоя ПВ влажностью 0,75 кг/кг составляет ε_0=0,256, взвешенного слоя при устойчивом кипении ε= 0,852. Тогда коэффициент расширения слоя k=5,047.

Полученное уравнение (1) является математической моделью процесса сушки пищевых волокон, построенной исключительно на основе экспериментальных данных и применительно только к данному объекту или продуктам со схожими свойствами в указанных диапазонах изменения влияющих факторов. Таким образом, четко проявляется следующая проблема: чем выше уровень детализации результата при реализации модели, тем более ограниченна возможность его практического использования, чем полнее модель – тем меньше ее общепознавательная ценность [8].

Для исследования процессов и аппаратов пищевой технологии в масштабах и условиях промышленного производства перспективно использование физического моделирования. Исследование на моделях широко применяется для проверки и совершенствования новых, еще не апробированных на практике конструкций в процессе проектирования. Метод моделирования базируется на принципах, вытекающих из теории подобия, которая является научной основой обобщения опытных данных, своего рода теорией эксперимента, указывающей путь к такой постановке опытов, чтобы их результаты могли быть распространены на всю область изучаемых явлений того же класса. Теория подобия применяется при изучении сложных процессов и дает возможность получать обобщенные критериальные уравнения, описывающие эти процессы. Критерии подобия, входящие в обобщенное уравнение, получают на основе анализа системы алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих процесс (включая условия однозначности).

Тепломассоперенос в процессе сушки в кипящем слое продукта достаточно сложен для математического описания, потому не представляется возможным достаточно корректно решить описывающее его дифференциальное уравнение, можно лишь в самом общем виде представить зависимость между различными переменными, влияющими на протекание процесса. В таких случаях для получения критериев подобия используют метод анализа размерностей. При этом необходимо знать из опытных данных, какие именно факторы (физические величины) оказывают наиболее существенное влияние на определяемую величину, а какие – незначительное. Далее необходимо найти связь между ними в виде некоторой, например, степенной, функциональной зависимости. Ранее методом анализа размерностей получено критериальное уравнение процесса сушки ПВ в псевдоожиженном слое сушки для зон свободной, капиллярной и структурно связанной влаги (концентрация сухих веществ от 0,07 до 0,7–0,8 кг/кг) [9]. В качестве исходных данных были использованы кривые скорости сушки пищевых волокон при различных режимах, полученные дифференцированием эмпирических уравнений кривых обезвоживания.

Для использования в инженерных расчетах важно получение математического описания процесса на всем интервале изменения влажности (от начальной до требуемой конечной).

Основываясь на экспериментальных данных, которые показывают, что на участке, соответствующем удалению влаги, связанной с материалом тепловыми эффектами, зависимость скорости влагоудаления от концентрации сухих веществ можно принять линейной, учитывая характер кривой изменения скорости (кривая *а* на рис. 1), а также небольшую величину диапазона изменения концентрации сухих веществ на этом этапе (от 0,7–0,8 кг/кг до 0,9 кг/кг).

Математическая обработка кривых скорости сушки в этой зоне для различных режимов обезвоживания, аппроксимированных линейными зависимостями, показала незначительный разброс величины тангенса угла наклона прямых, поэтому можно принять среднее значение $tg(\alpha) = 1{,}5399$.

Исходя из этого, скорость сушки $\frac{dc}{d\tau}$, c^{-1} на участке удаления связанной влаги можно выразить в виде:

$$\frac{dc}{d\tau} = 1{,}5399 \cdot c + p,$$

где $p = 1{,}5399 \cdot c_p$, т.к. при достижении равновесной влажности скорость сушки становится равной нулю.

Значение величины равновесной концентрации сухих веществ c_p можно определить из анализа изотерм сорбции продукта для заданных параметров сушильного агента.

В результате получена система уравнений, описывающая кинетику процесса обезвоживания в псевдоожиженном слое на интервале изменения влажности от начальной до требуемой конечной:

$$\begin{aligned} &\frac{\left(\frac{dc}{d\tau}\right) \cdot T \cdot \lambda}{V^4 \cdot \rho} = \exp(-25{,}6145) \cdot \left(\frac{c_м \cdot T}{V^2}\right)^{0{,}6785} \cdot \left(\frac{c}{c_н}\right)^{0{,}1163} \\ &\frac{dc}{d\tau} = 1{,}5399 \cdot c + p \\ &p = 1{,}5399 \cdot c_p \end{aligned} \qquad (2)$$

где ρ, кг/м^3 – плотность продукта; $c_м$, Дж/кг·К – теплоемкость продукта; λ, Вт/м·К – теплопроводность продукта, c, кг/кг – текущая концентрация сухих веществ продукта.

Решив систему уравнений, получим значение концентрации сухих веществ в продукте C_{2k} на границе зон сушки для зон свободной, капиллярной и структурно связанной влаги и зоны удаления влаги, связанной с материалом тепловыми эффектами (рис. 1).

Затем интегрированием каждого уравнения системы в пределах от начальной концентрации сухих веществ до C_{2k} и от C_{2k} до требуемой конечной соответственно получим продолжительность процесса обезвоживания. Общая продолжительность процесса обезвоживания от начальной влажности до влажности готового продукта определится суммированием рассчитанных значений.

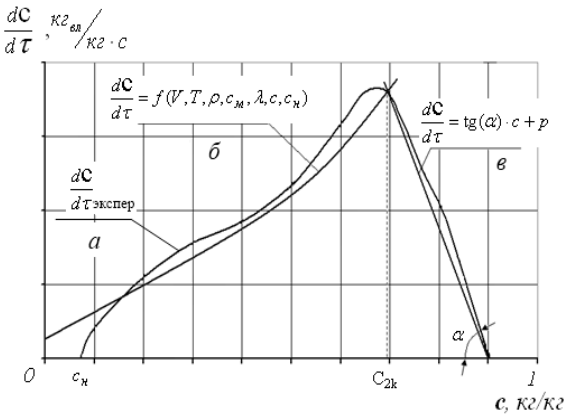

Рис. 1. Схема моделирования и расчета кинетики сушильного процесса:
а – кривая скорости сушки пищевых волокон, построенная путем дифференцирования эмпирических уравнений кривых обезвоживания; *б* и *в* – графическая интерпретация системы уравнений (2) кинетики процесса обезвоживания соответственно для зоны удаления свободной, капиллярной и структурно связанной влаги и зоны удаления влаги, связанной с материалом тепловыми эффектами

Расчет скорости сушки по полученной системе при определенных режимных параметрах дает результат с относительной погрешностью не более 15 %.

Результаты и их обсуждение

В ходе проделанной работы была получена расчетная зависимость (1) для определения производительности сушильной установки в условиях варьирования влияющих на интенсивность протекания процесса факторов, где границы варьирования факторов подобраны, исходя из технологических ограничений, и обоснованы экспериментально.

Получена система уравнений (2), описывающая кинетику процесса обезвоживания в псевдоожиженном слое на заданном интервале изменения влажности, решая которую, можно получить значение концентрации сухих веществ в продукте на границе зон сушки, для зон свободной, капиллярной и структурно связанной влаги и зоны удаления влаги, связанной с материалом тепловыми эффектами. При интегрировании каждого уравнения системы в пределах от начальной концентрации сухих веществ до требуемой конечной, результатом будет продолжительность процесса обезвоживания, где общая продолжительность процесса обезвоживания от начальной влажности до влажности готового продукта определится суммированием рассчитанных значений.

Таким образом, используя два подхода при моделировании, была получена статистическая модель (1) и модель в обобщенных координатах (2) процесса сушки дисперсного материала в кипящем слое. При этом полиномиальная зависимость скорости сушки от влияющих факторов (1) получена с помощью полуэмпирического зонального метода расчета и разработана для частного случая, т.е. для математического описания кинетики процесса сушки пищевых волокон тыквы в кипящем слое. Она является более точной, при этом количество значащих цифр в полученном уравнении обусловлено необходимой точностью аппроксимации экспери-

ментальных данных. Математическая модель (2) разработана для возможности распространения результатов исследований кинетики сушки на подобные материалы с учетом инвариантности критериев и симплексов подобия и может быть использована при проектировании рациональных сушильных установок кипящего слоя для перехода от лабораторных масштабов к промышленным с достаточной степенью надежности [10]. В этом случае окончательный переход к данным, относящимся к единичному конкретному процессу, совершается на последней стадии исследования и сводится к подстановке численных значений параметров в критериальное уравнение.

Таким образом, преимущества, имеющиеся у построенной посредством применения теории подобия модели, очевидны. Обобщенное уравнение (2) является более рациональной формой представления результатов, чем уравнения типа (1). Но, к сожалению, из-за большой сложности процессов тепломассообмена абсолютно доминирующее значение получают методы, в которых задачи ставятся в конкретно числовой форме, соответственно, и конечный результат в предельно возможной форме индивидуализирован.

Численные методы и компьютерные технологии способны решить проблемы расчета процессов сушки. Причем в этом направлении наука, кажется, развивается быстрее, чем понимание сущности процессов. Почти все доступные модели для твердых материалов сушки можно использовать только для конкретной материальной системы.

Общность модели по-прежнему остается одной из основных проблем в связи с отсутствием фундаментальных данных.

Конструкция, эксплуатация и оптимизация промышленных сушилок требуют всеобъемлющей математической модели, которая синтезирует в себе точность, общность и простоту [11, 12, 13].

Список литературы

1. Филоненко, Г.К. Кинетика сушильного процесса / Г.К. Филоненко; Иван. энергет. ин-т им. В.И. Ленина. – М. – Л.: Оборониздат, 1939. – 140 с.

2. Рудобашта, С.П. Зональный метод расчета кинетики процесса сушки / С.П. Рудобашта, Э.Н. Очнев, А.Н. Плановский // Теоретические основы хим. технологии. – 1975. – Т. 9, № 2. – С. 185–192.

3. Куц, П.С. Обобщенное уравнение кинетики процесса конвективной сушки влажных материалов / П.С. Куц, В.Я. Шкляр, А.И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. – 1987. – Т. 53. – № 1. – С. 90–96.

4. Данилов, О.Л. Особенности расчета кинетики с помощью обобщенных кривых сушки / О.Л. Данилов, С.И. Коновальцев, Г. Мартымов // Проблемы энергетики теплотехнологии в отраслях АПК, перерабатывающих растительное сырье: тез. докл. Республиканской науч.-техн. конф. – М.: МГАПП, 1994. – С. 31–32.

5. Коновалов, В.И. Расчет кинетики процессов сушки на базе соотношений теплопереноса / В.И. Коновалов. – Тамбов, 1978. – 32 с.

6. Фролов, В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / В.Ф. Фролов. – Л.: Химия, 1987. – 207 с.

7. Титова, Л.М. Влияние основных факторов на интенсивность сушки пищевых волокон / Л.М. Титова, А.В. Ревина, Ю.А. Максименко // Вестник АГТУ. – № 6 (41). – 2007. – С. 132–133.

8. Гухман, А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена / А.А. Гухман. – М.: Высшая школа, 1974. – 328 с.

9. Титова, Л.М. Кинетическая модель в обобщенных координатах процесса сушки пищевых волокон в кипящем слое / Л.М. Титова, И.Ю. Алексанян, Ю.А. Максименко // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – № 4. – 2009. – С. 72–74.

10. Розен, А.М. Масштабный переход в химической технологии / А.М. Розен. – М.: Химия, 1980. – 23 с.

11. Wei Wang, Guohua Chen, Arun S. Mujumdar. A Model for Drying of Porous Materials: From Generality to Specific Applications // Drying Technology: An International Journal. Special Issue: Selected Papers Presented at the 17th International Drying Symposium (IDS2010), Part 1 . – Vol. 29, Issue 13, 2011. – P. 659–668.

12. Reihaneh Golestani, Ahmadreza Raisi, Abdolreza Aroujalian. Mathematical Modeling on Air Drying of Apples Considering Shrinkage and Variable Diffusion Coefficient // Drying Technology: An International Journal. – Vol. 31, Issue 1, – 2013. – P. 40–51.

13. Patrick Perré. A Review of Modern Computational and Experimental Tools Relevant to the Field of Drying // Drying Technology: An International Journal. Special Issue: Selected Papers Presented at the 17th International Drying Symposium (IDS2010), Part 1. – Vol. 29, Issue 13. – 2011. – P. 1529–1541.

ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет»,
414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 16.
Тел. (8512)61-43-00; факс 61-43-66,
e-mail: post@astu.org

SUMMARY

I. Yu. Aleksanyan, L. M. Titova, A. H.-H. Nugmanov

MODELING OF PARTICULATE MATERIAL DRYING IN A FLUIDIZED BED

To develop rational designs of units and optimum modes of drying it is necessary to know the kinetic regularities of the process and the conditions of its modeling. Using two approaches for modeling a statistical model and a model in generalized coordinates of the particulate material drying in a fluidized bed were obtained. The advantages and disadvantages, as well as the application of the developed models are shown. The first model was developed using a semi-empirical zonal method of calculation and is valid for mathematical description of the kinetics of the studied object drying. The model is more accurate, while the number of significant figures in this equation is due to the required accuracy of approximation of experimental data. However, the result of the calculation when using this model in the maximum possible form is individualized. The mathematical model in generalized coordinates was developed for possible applying of research results on kinetics of drying to similar materials taking into account invariance of criteria and simplexes of similarity. It can be used in the design of rational fluidized bed dryers for transition from a laboratory scale to the industrial one with a sufficient degree of reliability. In this case, the final transfer to the data relating to an individual specific process takes place at the last stage of the investigation and is reduced to the substitution of the numerical values of the parameters in the dimensionless equation. A generalized equation is a more streamlined presentation of the results than empirical ones. The methods in which specific tasks are put in the numerical form have the dominant value because of the great complexity of the processes of heat transfer. The model generality remains a major problem due to the lack of basic data. Design, maintenance and optimization of industrial dryers require a comprehensive mathematical model synthesizing accuracy, generality and simplicity.

Dryer, fluidized bed, dehydration kinetics, mathematical model.

REFERENCES

1. Filonenko G.K. Kinetika sushil'nogo protsessa [Kinetics of drying process]. Moscow, Oboronizdat, 1939. 140 p.
2. Rudobashta S.P., Ochnev E.N., Planovskii A.N. Zonal'nyi metod rascheta kinetiki protsessa sushki [The zonal method for calculating the kinetics of the drying process]. Theoretical bases of chemical. technology. 1975. no. 2, pp. 185-192.
3. Kuts P.S, Shkliar V.Ia., Ol'shanskii A.I. Obobshchennoe uravnenie kinetiki protsessa konvektivnoi sushki vlazhnykh materialov [Generalized kinetic equation of convective drying process of moist materials]. Journal of Engineering Physics, 1987, no. 1. pp. 90-96.
4. Danilov O.L., S.I. Konoval'tsev, G. Martymov. Osobennosti rascheta kinetiki s pomoshch'iu obobshchennykh krivykh sushki [Features calculating the kinetics using the generalized drying curves]. Tez. dokl. Respublikanskoi nauch.-tekhn. konf. “Problemy energetiki teplotekhnologii v otrasliakh APK, pererabatyvaiushchikh rastitel'noe syr'e” [Proc. of reports. Republican scientific and engineering. conf. "Problems in the sectors of Energy thermotehnologi agribusiness processing vegetable raw materials"]. Moscow, 1994, pp. 31-32.
5. Konovalov V.I. Raschet kinetiki protsessov sushki na baze sootnoshenii teploperenosa [Calculation of the kinetics of the drying process on the basis of heat transfer ratios]. Tambov, 1978. 32 p.
6. Frolov V.F. Modelirovanie sushki dispersnykh materialov [Modeling drying of dispersed materials]. Leningrad, Chemistry, 1987. 207 p.
7. Titova L.M., Revina A.V., Maksimenko Iu.A. Vliianie osnovnykh faktorov na intensivnost' sushki pishchevykh volokon [Influence of the main factors on the drying rate of dietary fiber]. Herald ASTU, 2007, no. 6 (41), pp. 132-133.
8. Gukhman A.A. Primenenie teorii podobiia k issledovaniiu protsessov teplo-massoobmena [Application of similarity theory to the study of the processes of heat and mass transfer]. Moscow, Higher School, 1974. 328 p.
9. Titova L.M., Aleksanian I.Iu., Maksimenko Iu.A. Kineticheskaia model' v obobshchennykh koordinatakh protsessa sushki pishchevykh volokon v kipiashchem sloe [Kinetic model in generalized coordinates of the drying process of dietary fiber in a fluidized bed]. News of higher educational institutions. Food technology. 2009, no. 4. pp. 72-74.
10. Rosen A.M. Masshtabnyi perekhod v khimicheskoi tekhnologii [Major shift in chemical technology]. Moscow: Chemistry, 1980. 23 p.
11. Wei Wang, Guohua Chen, Arun S. Mujumdar. A Model for Drying of Porous Materials: From Generality to Specific Applications. Drying Technology: An International Journal. Special Issue: Selected Papers Presented at the 17th International Drying Symposium (IDS2010), Part 1. 2011, vol. 29, iss. 13, pp. 659-668.
12. Reihaneh Golestani, Ahmadreza Raisi, Abdolreza Aroujalian. Mathematical Modeling on Air Drying of Apples Considering Shrinkage and Variable Diffusion Coefficient. Drying Technology: An International Journal. 2013, vol. 31, iss. 1, pp. 40-51.
13. Patrick Perré. A Review of Modern Computational and Experimental Tools Relevant to the Field of Drying. Drying Technology: An International Journal. Special Issue: Selected Papers Presented at the 17th International Drying Symposium (IDS2010), Part 1. 2011, vol. 29, iss. 13. pp. 1529-1541.

Astrakhan State Technical University,
16, Tatishcheva, Astrakhan, 414056 Russia.
Phone/fax: (8512) 61-43-40/ (8512) 61-43-66,
e-mail: post@astu.org

Дата поступления: 21.05.2014