

## Некоторые особенности моделирования сушиллки с кипящим слоем инертных тел

*А.Н. Пахомов, С.В. Васенина, И.А. Бирюкова, Е.Ю. Комбарова,*

*И.Г. Позднышева*

*Тамбовский государственный технический университет, Тамбов*

**Аннотация:** В статье представлено описание основных факторов, учет которых необходим для корректного моделирования процесса сушки в кипящем слое инертных тел. Приведены основные трудности, встречающиеся при масштабировании лабораторных сушилок. Указан характер влияния взаимодействия частиц инерта и сушильного агента на тепло-массообмен в процессе сушки. Дано описание статистической модели, использованной для моделирования характера взаимодействия частиц инертного материала. Указаны основные параметры и допущения модели. Приведены условия проведения экспериментов по анализу характера движения отдельных частиц в кипящем слое.

**Ключевые слова:** моделирование, псевдооживление, инерт, сушка, режим, частица, слой, траектория, масштабирование.

Основным фактором, сдерживающим ускоренную разработку аппаратуры для сушки жидких дисперсных продуктов в аппаратах с кипящим слоем инертных тел, является сложность перехода от результатов экспериментов на лабораторной установке к получению результатов на промышленной установке [1]. Как правило, при таком переходе нарушается гидродинамика процесса, что связано с неравномерностью поступления либо высушиваемого продукта, либо тепла, либо сушильного агента в зону сушки, различную для лабораторной и промышленной установки. Как правило, применение полученных на лабораторной установке эмпирических зависимостей оказывается сложным, то есть не позволяет получать расчетные данные промышленных установок в диапазоне допустимой погрешности. Например, для сушилок с кипящим слоем такая погрешность может достигать 30-50 % [2]. Соответственно при проведение экспериментов на лабораторных сушилках необходимо создание математического описания наиболее близкого и адекватного к физической сущности процессов, протекающих в лабораторном аппарате.

Основной сложностью такого описания является тот факт, что кипящий слой представляет собой двухфазную систему неоднородную как в пространстве, так и нестационарную во времени. При этом, теплофизические свойства такой системы, а также возможное наличие химических превращений, как правило, определяют качество готового сухого продукта [3, 4]. При прохождении сушильного агента через слой кипящих частиц происходит определенное, трудно формализуемое, взаимодействие сушильного агента с частицами. Такое взаимодействие лимитируется различными физическими явлениями, происходящими в высушиваемом продукте. Для жидких продуктов это, например, явление структурообразования, для капиллярных продуктов это возможное диффузионное сопротивление оболочки продукта, различные явления термодиффузии и тому подобное, т.е. можно говорить, что взаимодействие сушильного агента с высушиваемым продуктом подчиняется определенным закономерностям, присущим только данной системе [5, 6, 8].

Характер взаимодействия сушильного агента, взаимодействие частиц слоя между собой, а также с потоком газа, все это создает в слое определенные пульсации. Также возможно возникновение неоднородности слоя, приводящее к неустойчивой работе аппарата. Пульсация слоя приводит также к изменениям тепло- и массообменных характеристик (коэффициентов теплообмена и массообмена) во времени и пространстве [7]. Такая особенность изменения рассмотренных коэффициентов должна быть отражена в моделях процесса или аппарата для расчета и применения их в реальных промышленных масштабах.

Для моделирования характера взаимодействия частиц инертного материала между собой и со стенками аппарата нами использовалась статистическая модель [5]. Основной идеей статистической модели является положение о хаотичном движении частиц в слое. При этом происходит непрерывное изменение положения частиц в аппарате, скорость частиц

может меняться скачкообразно для упрощения модели, изменение скорости может быть рассчитано исходя из взаимодействия частиц с газовым потоком с стенками аппарата или с другими частицами. В общем случае скорость изменения частицы должна подчиняться некоторым законам и лежать в определенных диапазонах, значения которых должны определенным образом коррелировать с экспериментальным наблюдением за движением частиц.

Подобного рода эксперименты проводились нами на специально разработанной установке [9]. Точность рассмотренной модели сильно зависит от количества частиц, которые берутся в рассмотрение для данного режима работы. Основной характеристикой движения всей совокупности частиц инертной фазы в аппарате является функция их распределения по координатам и скоростям во времени. В общем случае необходимо учитывать вес и форму частицы, а также характеристики поверхности. Важным фактором в рассмотрении подобной модели является время столкновения между частицами [10]. В первом приближении можно считать, что продолжительность столкновений частиц гораздо меньше, чем время их свободного движения. Однако такое предположение справедливо лишь для модельного слоя с небольшим количеством частиц. Положение о небольшом количестве частиц в слое приводит к определенному огрублению модели, что не соответствует истинному поведению частиц инерта в реальных слоях в сушильном аппарате [11].

На рисунке 1 представлены характерные полученные траектории движения отдельной частицы инерта в лабораторной сушилке. Получены результаты для фторопластовой частицы, имеющей форму куба и алюминиевой частицы, имеющей форму цилиндра. В экспериментах слой состоял из подобных частиц. Количество частиц в слое равнялось 100, диаметр слоя 0,1 м., характерный размер частицы 1 мм.

Как видно из представленных рисунков траектория движения частицы в слое может быть рассмотрена в двух видах: 1) локальное хаотичное

движением частицы внутри аппарата внутри слоя; 2) упорядоченное циркуляционное движение частицы в слое.



Рис. 1. Характерные траектории отдельной частицы инерта в лабораторной сушилке (скриншот программы видеофиксации)

Моделирование поведения отдельной частицы в слое позволяет оценить значение скорости движения частицы в различных частях слоя и соответственно оценить значение коэффициентов тепло- и массообмена в слое, что позволит рассчитать кинетику процесса сушки наиболее близко к реальному процессу в аппарате. Недостатком такой модели является упрощение поведения частицы, вследствие предположения о небольшом количестве частиц в слое, что, как правило, сильно не соответствует реальному аппарату. Оценки коэффициентов теплоотдачи, полученных по статистической модели (описанной выше) с реальными коэффициентами теплоотдачи, полученными, исходя из эксперимента для слоя инерта показывают, что расхождение коэффициента теплоотдачи в эксперименте и в расчете по модели составляет не более 15-18%.

### Литература

1. Пахомов, А.Н., Пахомова Ю.В. Сушка капель жидких дисперсных продуктов. – М.: Издательство «Перо», 2013. – 122с.



2. Богомягких, В.А., Климович А.Л., Ляшенко А.С. К определению условного диаметра реальной частицы дискретного сыпучего тела // Инженерный вестник Дона, 2014, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2468

3. Пахомов, А.Н. Кинетика сушки дисперсий на твердых подложках: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08: защищена: 16.03.2001 / Пахомов Андрей Николаевич. – Тамбов, 2000. – 225 с.

4. Савушкин, А.В., Лекомцев П.Л., Дресвянникова Е.В., Ниязов А.М. Электроаэрозольное увлажнение воздуха. Особенности подбора параметров работы генератора // Инженерный вестник Дона, 2012, № 2. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/857

5. Пахомов, А.Н., Пахомова Ю.В., Ильин Е.А. Возможности самоорганизации дисперсных систем при сушке на подложке // Вестник Тамбовского государственного технического университета. - 2012.- Т. 18, №3. - С.633 – 637.

6. Пахомов, А.Н., Пахомова Ю.В. Типы кинетических кривых, получаемых при сушке капель жидких дисперсных продуктов // Химическая технология. - 2014. - №10. - С. 620-623.

7. Пахомова, Ю.В., Коновалов В.И. Оценка качества готового продукта при сушке жидких дисперсных веществ // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2011. – № 2(33). – С. 407–412.

8. Pakhomov A.N., Banin R.Y., Chernikh E.A., Loviagina E.Y., Sorokina N.S. Method of determination of adhesion of the film dries distillery grains on the substrate // Applied and Fundamental Studies: Proceedings of the 5th International Academic Conference. - St. Louis, USA: Publishing House Science and Innovation Center, 2014. - pp. 71-72.

9. Pakhomova Yu. V., Mamedova M.A., Krivopalova D.A., Kochetov V.V. Product supply and monitoring of fluidized bed // European Applied Sciences: challenges and solutions 2nd International Scientific Conference. Stuttgart, Germany, 2015. - pp. 121-122.

10. Pakhomova Yu., Sirotkin A., Skripnikova S., Zagrebnev R. Modeling the kinetics of drying of liquids on the substrate // Science and practice: a new level of integration in the modern world. Sheffield, UK, 2016. - pp. 168-169.

11. Pakhomova Yu., Biryukova I., Vasenina S., Kombarova H., Pozdnisheva I. To calculate the shape of a drop lying on a horizontal surface // Science and practice: a new level of integration in the modern world. Sheffield, UK, 2016. - pp. 170-171.

### References

1. Pakhomov, A.N., Pakhomova Yu.V. Sushka kapel' zhidkikh dispersnykh produktov [Drying drops of liquid dispersed products]. M.: Izdatel'stvo «Pero», 2013. 122p.

2. Bogomyagkikh V.A., Klimovich A.L., Lyashenko A.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №3, URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2468](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2468)

3. Pakhomov, A.N. Kinetika sushki dispersiy na tverdykh podlozhkakh [The kinetics of drying of the dispersions on solid substrates]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.17.08: zashchishchena : 16.03.2001. Pakhomov Andrey Nikolaevich. Tambov, 2000. 225 p.

4. Savushkin A.V., Lekomtsev P.L., Dresvyannikova E.V., Niyazov A.M. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, № 2, URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/857](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/857)

5. Pahomov A.N., Pahomova Ju.V., Ilin E.A. Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2012. V. 18, №3. pp.633 – 637.



6. Pakhomov, A.N., Pakhomova Yu.V. Himicheskaja tehnologija. 2014. №10. pp. 620-623.
7. Pakhomova Yu.V., Konovalov V.I. Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo. 2011. № 2(33). pp. 407–412.
8. Pakhomov A.N., Banin R.Y., Chernikh E.A., Loviagina E.Y., Sorokina N.S. Applied and Fundamental Studies: Proceedings of the 5th International Academic Conference. St. Louis, USA: Publishing House Science and Innovation Center, 2014. pp. 71-72.
9. Pakhomova Yu. V., Mamedova M.A., Krivopalova D.A., Kochetov V.V. European Applied Sciences: challenges and solutions. 2nd International Scientific Conference. Stuttgart, Germany, 2015. pp. 121-122.
10. Pakhomova Yu., Sirotkin A., Skripnikova S., Zagrebnev R. Science and practice: a new level of integration in the modern world. Sheffield, UK, 2016. pp. 168-169
11. Pakhomova Yu., Biryukova I., Vasenina S., Kombarova H., Pozdnisheva I. Science and practice: a new level of integration in the modern world. Sheffield, UK, 2016. pp. 170-171.