

Секция: Технические науки

Сажин Виктор Борисович

*доктор технических наук, профессор, академик, директор Фонда
Российский инвестиционно-инновационный Фонд «Научная Перспектива»
г. Москва, Россия*

Сажин Борис Степанович

*доктор технических наук, профессор, академик, советник Фонда
Российский инвестиционно-инновационный Фонд «Научная Перспектива»
г. Москва, Россия*

НОВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК ОБЪЕКТОВ СУШКИ

Сушка – технологический процесс, являющийся одним из самых распространенных в промышленности (химическая и целый ряд смежных отраслей, лесная, пищевая и др.), а также в сельском хозяйстве. Сушка является одним из самых энергоемких технологических процессов (уступая лишь энергоемкости в металлургии). Так до 85% всех энергозатрат химического предприятия приходится именно на сушку. В настоящее время ассортимент материалов, подлежащих сушке, включает сотни тысяч наименования, причем с каждым годом этот перечень увеличивается на 10-20 тысяч новых материалов [1-5]. Разработанная авторами принципиально новая классификация материалов как объектов сушки, не противоречащая наиболее авторитетным классификациям (П.А. Ребиндера, А.В. Лыкова и другим), к тому же обладающая существенно большими возможностями (чем любая из известных), должна стать своеобразной «дорожной картой» для представителей прикладной науки, бизнеса и промышленности, специализирующихся в области сушки дисперсных материалов, поскольку позволяет на основании всего лишь

двух характеристик материала (определяемых экспериментально критического размера пор и адгезионно-аутогезионного коэффициента) рекомендовать наиболее эффективные гидродинамические режимы и аппараты для их реализации [3; 4; 6-10; 17-21].

Принципиально важным для эффективной реализации процесса сушки является корректный расчет необходимого времени сушки для конкретного материала. Рассчитать необходимую продолжительность сушки в условиях взвешенного слоя можно, используя принцип соответственных состояний и данные по кинетике сушки модельных материалов.

Время сушки в аппаратах со взвешенным слоем высушиваемого материала определяется величинами диффузионного и термического сопротивлений, которые могут быть оценены в результате комплексного анализа материала как объекта сушки [11-18] и, в первую очередь, на основе сорбционно-структурных и тепловых характеристик. В период постоянной скорости сушки происходит испарение жидкости с поверхности материала и перемещаемой к ней жидкости макрокапилляров и крупных пор диаметром более 100 нм.

Для этого периода характерно изменение (увеличение или понижение) температуры материала до температуры адиабатического насыщения среды. При этом время удаления жидкости в первом приближении равно времени, в течение которого в процессе сушки материалу подводится количество тепла, необходимое для его прогрева до температуры испарения жидкости [1-4; 25-28].

Для определения времени прогрева τ' частиц дисперсного материала при сушке в аппарате со взвешенным слоем, где внешний массообмен не лимитирует процесс, рассчитывают критерий Био Bi и балансовое отношение тепла, поглощенного системой в заданном состоянии Q , к теплу, поглощенному системой в предельном состоянии Q_0 :

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{c_M(\theta_{II} - \theta_H) + r_{II} \frac{U_H - U_{M.CB}}{100} + c_{ж} \frac{U_H}{100}(\theta_{II} - \theta_H)}{c_M(t - \theta_H) + r_{II} \frac{U_H}{100} + c_{ж} \frac{U_H}{100}(t - \theta_H)} \quad (1)$$

где $c_M, c_{ж}$ - теплоемкость материала и удаляемой жидкости; θ_H, θ_{II} - температура материала начальная и при которой происходит испарение; $U_H, U_{M.CB}$ - начальное содержание жидкости в материале и максимальное связанной жидкости; t - температура сушильного агента; r_{II} - теплота парообразования. При расчете числа $Bi = \alpha R / \lambda$ принимают гарантированное значение коэффициента теплообмена α в условиях взвешенного слоя, равное 116 Вт/(м²·К). По рассчитанным значениям Bi и Q/Q_0 определяют значение теплового критерия Фурье Fo , из которого можно получить время τ' , в течение которого к частице материала радиусом R с известными тепловыми характеристиками (α, λ и c) будет подведено необходимое для сушки количество тепла. (Для определения величин α, λ и c нами был рекомендован метод двух температурно-временных точек [1; 7; 22-25]). После испарения свободной жидкости и жидкости макрокапилляров начинается испарение влаги из микрокапилляров. Поверхность испарения углубляется, и скорость сушки падает. Перенос влаги при испарении из микрокапилляров в изотермических условиях происходит в результате диффузии и пленочного передвижения жидкости. Механизм и интенсивность внутреннего переноса жидкости зависят от размеров пор. При удалении из материала адсорбционно связанной жидкости её нужно сначала внутри материала превратить в пар, скорость диффузии которого к поверхности материала также определяется размерами пор. Анализ происходящего внутри материала процесса переноса влаги показывает, что время удаления влаги из пор различного диаметра различно и составляет доли секунд при обычной диффузии в крупных порах и несколько минут (или даже несколько десятков минут) при диффузии в ультрамикропорах. Реальные материалы имеют сложную структуру и содержат поры

различных размеров, поэтому продолжительность их сушки будет зависеть от количественного соотношения пор различных диаметров. Исходя из того, что содержанию жидкости в материале соответствует заполнение пор определенного размера и предполагая, что удаление этой жидкости происходит последовательно (сначала из более крупных пор, а затем все более мелких), продолжительность удаления жидкости из материала будет складываться из продолжительности её удаления из каждой группы пор, отличающихся по размерам [7; 29-31].

Если обозначить среднюю скорость удаления жидкости из пор диаметром от d_i до d_{i+1} через \bar{N}_i , то время τ_i опорожнения пор таких размеров можно определить из выражения

$$\tau_i = \frac{1}{\bar{N}_i} \frac{\rho_{ж}}{\rho_m} \int_{d_i}^{d_{i+1}} f_V(d) d(d) = K_i \Delta U_i \quad (2)$$

где $\rho_m, \rho_{ж}$ – плотность абсолютно сухого материала и жидкости, удаляемой в процессе сушки; f_V – функция распределения объема пор по диаметрам; K_i – коэффициент, обратно пропорциональный средней скорости удаления жидкости из i -ой группы пор; $K_i = 1/\bar{N}_i$; ΔU_i – содержание жидкости в материале, соответствующее заполнению пор диаметром от d_i до d_{i+1} . Продолжительность τ'' удаления жидкости из микрокапилляров материала, имеющего разнопористую структуру, можно определить из соотношения

$$\tau'' = \sum_{i=1}^{i=n} \tau_i = \sum_{i=1}^{i=n} K_i \Delta U_i \quad (3)$$

Тогда общее время сушки пористого материала

$$\tau = \tau' + \tau'' = \tau' + \sum_{i=1}^{i=n} K_i \Delta U_i \quad (4)$$

Очевидно, что размером пор определяется механизм переноса жидкости внутри материала в процессе сушки. Исходя из этого можно

условно разбить поры на 5 групп.

Первую группу составляют поры диаметром от 100 до 8 нм (от 10^{-5} до $8 \cdot 10^{-7}$ см). В порах такого диаметра основным механизмом переноса является испарение жидкости из жидкой пленки со стенок капилляров, перенос пара осуществляется под действием кнудсеновской диффузии. Поверхностная диффузия не вносит ощутимого вклада в процесс переноса и составляет не более 4% от общего потока влаги при $d = 10$ нм, а при $d = 5$ нм составляет, по различным данным 13-15%. Ко второй группе относятся поры диаметром от 8 до 6 нм. Основным механизмом переноса в этой группе является кнудсеновская диффузия, коэффициент которой существенно зависит от размера пор, и поверхностная диффузия, вклад которой в общий поток жидкости становится все более ощутимым.

Третью группу составляют поры диаметром от 6 до 4 нм; в этой группе основными механизмами переноса являются также кнудсеновская и поверхностная диффузия. В порах четвертой группы ($d = 4 \div 2$ нм) вклад поверхностной диффузии весьма существен и при $d = 2$ нм может составлять 80% от общего потока массы [1-5]. Скорость сушки падает вследствие меньшей скорости передвижения жидкости в жидкой пленке по сравнению с переносом её по поровым каналам в виде пара [7]. Последнюю пятую группу составляют ультрамикropоры, т.е. поры, диаметр которых соизмерим с размером молекул удаляемой жидкости. В ультрамикropорах диффузия пара весьма затруднена и не является уже ни кнудсеновской, ни поверхностной (это уже - твердотельная диффузия). Для определения продолжительности сушки по соотношению (4) построена номограмма (рис. 1 и табл. 1) [1; 4; 7; 25-29].

Авторы разработали Классификационную Таблицу [1; 4; 19-24], которую известные химики-технологи (проф. В.С. Бесков, заведующий кафедрой общей химической технологии в Российском химико-

технологическом университете им. Менделеева и другие) сравнивают по информативности и прогностическим возможностям с Периодической таблицей химических элементов Д.И. Менделеева (Организация Объединенных Наций объявила 2019 год «Годом периодической таблицы химических элементов»).

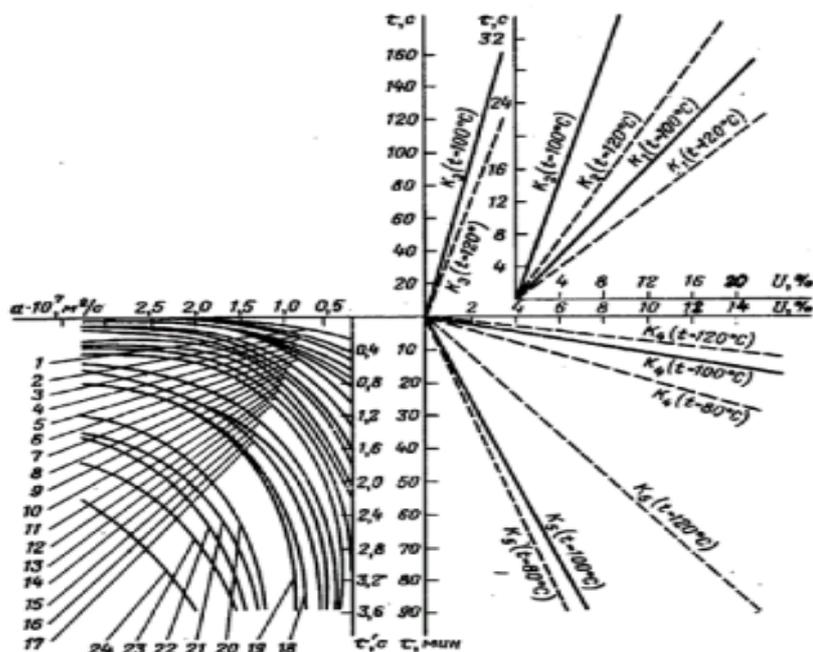


Рис. 1. Номограмма для определения времени сушки частиц дисперсного материала во взвешенном слое [1]

Таблица 1

Значения параметров к номограмме (рис. 1).

Кривая	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_{ч}, \text{мм}$	0,0025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,025	0,05	0,05
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,2
Q/Q_0	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5
Кривая	9	10	11	12	13	14	15	16
$R_{ч}, \text{мм}$	0,25	0,05	0,05	0,05	0,25	0,05	0,25	0,25
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,2	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1
Q/Q_0	0,5	0,5	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,7
Кривая	17	18	19	20	21	22	23	24
$R_{ч}, \text{мм}$	0,25	0,25	0,5	0,25	0,5	0,25	0,5	0,5
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3
Q/Q_0	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,9	0,7	0,5

Классификационная Таблица учитывает характер технологической задачи (по величине критерия Био) и впервые устанавливает соответствие классификации влажных материалов с классификацией пор по размерам. Новая классификация позволяет по положению материала в классификационной таблице определить продолжительность сушки материала во взвешенном слое, а, следовательно, идентифицировать эффективный гидродинамический режим и выбрать рациональную сушилку из числа типовых.

Типовые сушилки отобраны из большого массива технических разработок с использованием разработанного нами метода оценки совершенства сушилок по величине эксергетического КПД, с учетом их реальных технико-экономических показателей, результатов промышленной эксплуатации и др. Каждая из них прошла комплексный анализ и исследование в лабораторных и опытных условиях, в результате которых некоторые сушилки не попали в список для окончательной рекомендации (сушилки с классическим кипящим и фонтанирующим слоем, двухкамерные вихревые сушилки, прямоточные безуносные сушилки с закрученными потоками).

Базовая классификационная таблица 2 содержит 6 классов влажных дисперсных материалов, расположенных по мере усложнения технологической задачи по сушке.

Положение материала в таблице определяется двумя базовым показателями: критическому диаметру пор и величине адгезионно-аутогезионного коэффициента, которые получают (наряду с теплофизическими характеристиками) в результате комплексного анализа материалов как объектов сушки.

Место в классификационной таблице соответствует шифру данного материала (технологическая задача и ее решение) из трех цифр.

Таблица 2

Классификация дисперсных материалов как объектов сушки

Показатель технологической задачи (Bi')	Класс материалов	Шифр (класс, группа, разряд)	Критический диаметр пор $d_{кр}$, нм	Группа пор	Ранг адгезивно-аутогезионного коэффициента K_{a-k}	Показатель дисперсности		Характеристика пористой структуры материала и вида связи влаги	Продолжительность сушки в эффективном гидродинамическом режиме
						Грубодисперсные	Тонкодисперсные		
$Bi' < 0,1$	Первый	1.1.1.	Более 100	0	2	1		Непористые материалы со свободной влагой	0,5-2,0 с
		1.1.2.					2		
		1.2.1.				1			
		1.2.2.					2		
$Bi' < 1$	Второй	2.1.1.	100-8	1	2	1		Широкопористые материалы со слабо связанной влагой (Испарение жидкости из жидкой пленки)	3,0-5,0 с
		2.1.2.					2		
		2.2.1.				1			
		2.2.2.					2		
$Bi' < 10$	Третий	3.1.1.	8-6	2	3	1		Высоковлажные материалы с переходными порами со свободной и связанной влагой (Кнудсеновская диффузия)	10-40 с
		3.1.2.					2		
		3.2.1.				1			
		3.2.2.					2		
$Bi' < 20$	Четвертый	4.1.1.	6-4	3	2	1		Тонкие поры со свободной и связанной влагой (Кнудсеновская и поверхностная диффузия)	0,5-2,0 мин
		4.1.2.					2		
		4.2.1.				1			
		4.2.2.					2		
$Bi' \geq 20$	Пятый	5.1.1.	4-2	4	2	1		Микропоры со связанной влагой (поверхностная диффузия)	2-20 мин
		5.1.2.					2		
$20 < Bi' < 30$	Шестой	6.1.1.	Менее 2	5	1	До 1 мм	—	Ультрамикропоры соизмеримые с размерами молекул (твердотельная диффузия)	2-20 мин

Источник: разработка авторов

Первая цифра определяет время сушки во взвешенном слое и гидродинамический режим сушки (а через него - тип сушильного аппарата), вторая – тип питателя, третья – наличие (или отсутствие) пылевой фракции, определяющей систему улавливания сушильной установки.

В заключение отметим, что кроме указанных механизмов переноса при сушке материалов в неизотермических условиях возможен перенос влаги в результате термокапиллярного потока, капиллярно-осмотического или электроосмотического скольжения влаги, теплового скольжения пара, термодиффузии и т.д. [1; 4; 7; 19; 24].

Аналитическое описание переноса влаги к поверхности частиц, учитывающее все его виды, в настоящее время не представляется возможным, так как если суммарную скорость переноса влаги в порах различного диаметра выразить аддитивно через формально независимые потоки всех видов переноса, то отсутствие учёта взаимного влияния потоков может привести к серьезным ошибкам при определении времени сушки. Поэтому средняя скорость удаления влаги из каждой группы пор определена по кинетике сушки модельных материалов с разнороднопористой структурой в реальных аппаратах со взвешенным слоем при температурах сушильного агента 80–120⁰С (допустимый нагрев для массового ассортимента химических материалов и частично для полимеров). Все остальные параметры процесса задавались оптимальными на основе опытов по изучению влияния производительности и скорости сушильного агента на остаточную влажность продукта при определенной температуре теплоносителя.

Литература

1. Сажин, Б.С. Научные основы техники сушки / Б.С. Сажин, В.Б. Сажин. - Москва: Наука. 1997. - 448 с.

2. Научные основы термовлажностной обработки дисперсных материалов / Б.С. Сажин, В.Б. Сажин. М.: Химия, 2012. – 776 с.
3. Сажин, В.Б. Выбор и расчёт аппаратов с взвешенным слоем / В.Б. Сажин, М.Б. Сажина. М.: РосЗИТЛП. - 2001. – 336 с.
4. V. Sazhin and V. Sazhin Scientific Principles of Drying Technology /New York -Connecticut-Wallingford (U.K.): Begell House Inc.-2007.-506 PP.
5. Сажин, В.Б. Научные основы выбора эффективного сушильного оборудования / В.Б. Сажин, Б.С. Сажин. М.: Химия, 2013. – 544 с.
6. Сажин, В.Б. Сушка в закрученных потоках: теория, расчёт, решения. /В.Б. Сажин, М.Б. Сажина. М.: РосЗИТЛП. – 2001. – 324 с.
7. Сажин В.Б. Научные основы техники сушки дисперсных материалов при эффективных гидродинамических режимах взвешенного слоя. Дисс... доктора технич. наук (тт. 1 – 2). – М.: РХТУ, 2000.– 820 с.
8. Эксергетический анализ работы промышленных установок / Б.С. Сажин, А.П. Булеков, В.Б. Сажин. М.: Изд-во МТИ. 2000. – 297 с.
9. Сажин, В.Б. Анализ основных подходов к классификации материалов как объектов сушки / В.Б. Сажин, М.Б. Сажина, Б.С. Сажин // Известия вузов (химич. технология), Том 48, №5, 2005. – С. 99-104.
10. Сажин, В.Б. Анализ основных характеристик влажных материалов как объектов сушки / В.Б. Сажин и др. // Известия вузов: Химия и химическая технология, Т. 48, №12, 2005. С. 98-104.
11. Математическое моделирование движения газа в сепарационной зоне вихревого аппарата на основе ($\kappa\text{-}\epsilon$)-модели турбулентности / Б.С. Сажин, В.Б. Сажин и др. // ТОХТ. – 2001. – Т. 35. - № 5. – С. 472-478.
12. Математическая модель процесса сушки сыпучих продуктов в псевдооживленном слое / В.Б. Сажин и др. // Промышленная теплотехника / АН БССР, 1985, № 6, т. 7. - С. 40-46.
13. Сажин В.Б. Моделирование процесса сушки твёрдого материала /В.Б. Сажин и др. // ТОХТ, 1997, том 31, №4, с. 638-653.

14. Оценка эффективности работы аппаратов с активным гидродинамическим режимом на основе их эксергетических характеристик / Б.С. Сажин, А.П. Булеков, В.Б. Сажин // ТОХТ. - 1999. – Т. 33. - №5. – С. 521-527.
15. Разработка методов расчёта и повышения эффективности энергоёмких процессов отделочного производства / А.П. Булеков, В.Б. Сажин // Успехи в химии и химической технологии. XIII, 5. – 1999. – С. 12-14.
16. Сажин В.Б. Оптимизация аппаратного оформления сушильных процессов // Успехи в химии. Том XXI. – 2007. - №1 (69). – С. 49-65
17. Сушка в активных гидродинамических режимах / Б.С. Сажин, В.Б. Сажин и др. // ТОХТ. – 2008. – том 42. - №6. – С. 638-653.
18. Время сушки сыпучих продуктов в условиях псевдооживленного слоя / А.А. Ойгенблик, Б.А. Корягин, В.Б. Сажин и др. // Химическая промышленность. - №11. – 1989. – С. 66-72 (866-872).
19. Drying in Active Hidrodynamic Regimes / B.S. Sazhin, V.B. Sazhin etc. // Teor. Found. of Chem. Eng., 2008. – Vol. 42. – No. 6. - Pp. 837-851.
20. Sazhin V. & Sazhin B. Principles classifying materials as processing objects for the processes of drying and washing // Fund. science and technology V: in 2 vv. Vol. 1. - «SPC Academic», 2015. – P. 135-140.
21. Sazhin V etc. Modeling of drying and washing / Fund. and applied science today V: in 3 vv. Vol. 1. - «SPC Academic», SC, USA, 2015. – P. 113-117.
22. Sazhin V. & Sazhin B. Determination of thermal properties of materials as objects of thermal and humidity processing // Academ. science - problems and achievements III. – Vol. 2. - «SPC Academic», 2014. – P. 231-236.
23. V. Sazhin & B. Sazhin Evaluation of thermodynamic activity in the apparatus of the weighted layer // 21 Century: fund. science and technology VIII. Vol. 1. - North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2016. – P. 97-102.
24. Sazhin V. B., Sazhin B. S. Basis of classification of materials as objects of drying // Збірник центру наук. публ. Велес.: ч. 1 "Зимові наукові

- читання", м Київ: збірник статей (академічний рівень). - К.: Центр наукових публікацій, 2017. 128с. ISSN 5836-4978. - С. 86-97.
- 25.Sazhin V. & Sazhin B. Drying of disperse materials with quasi-static conditions // Academic science - problems and achievements XI, in 2 vv. Vol. 1. – North Charleston, SC, USA: CreateSpace. – 2017. – P. 142-145.
- 26.Sazhin V. & Sazhin B. Innovative implementation strategy of industrial drying processes in a fluidized bed // 21 Century: fundamental science and technology VIII, in 3 vs /Vol. 2 — North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2014. –241 p. (ISBN: 978-1495417696). - P. 154-157.
- 27.Сажин В.Б., Булеков А.П., Фирсаев И.Р. Численный алгоритм для оценки размеров готового продукта в аппаратах со взвешенным слоем инертного материала / Успехи в химии. – XIII. – 5. – 1999. – С. 46-49.
- 28.Сажин В.Б. Анализ теплопроводности для влажных дисперсных материалов // Успехи в химии. – Том XV. – 2001. - №1. – С. 33-37.
- 29.Сажин, В.Б. Создание эффективной сушильной установки и разработка промышленного кода / В.Б. Сажин, Б.С.Сажин // Межд. академический вестник (ISSN: 2312-5519). – 5(11). – 2015. – С. 99-102.
- 30.Основные проблемы сушки дисперсных материалов/ Б.С. Сажин, В.Б. Сажин // Успехи в химии. Том XXII. – 2008. – №1 (81). – С. 98-111.
- 31.Сажин, В.Б. Установка для теплофизического анализа дисперсных материалов методом плоского источника тепла/В.Б. Сажин, I. Seldinas, O. Seldinas// Успехи в химии. – Том XV. – 2001. – №1. – С. 37-41.