

Технические науки

УДК 66.047.7

**Сажин Виктор Борисович**

*доктор технических наук, профессор, академик, директор  
Российский инвестиционно-инновационный фонд «Научная Перспектива»*

**Сажин Віктор Борисович**

*доктор технічних наук, професор, академік, директор,  
Російський інвестиційно-інноваційний фонд «Наукова Перспектива»*

**Sazhin Viktor**

*Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician, Director  
Russian "Scientific Perspective" Investment and Innovation Fund*

**Сажин Борис Степанович**

*доктор технических наук, профессор, академик советник  
Российский инвестиционно-инновационный фонд «Научная Перспектива»*

**Сажин Борис Степанович**

*Доктор технічних наук, професор, академік, радник директорату,  
Російський інвестиційно-інноваційний фонд «Наукова Перспектива»*

**Sazhin Borys**

*Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician, Adviser  
Russian "Scientific Perspective" Investment and Innovation Fund*

**КОМПЛЕКСНАЯ СТРАТЕГИЯ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО  
АППАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ПРОЦЕССА СУШКИ  
КОМПЛЕКСНА СТРАТЕГІЯ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНОГО  
АППАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ  
СУШІННЯ  
COMPLEX STRATEGY OF CHOICE OF RATIONAL HARDWARE-  
TECHNOLOGICAL SUPPORT OF DRYING PROCESS**

**Аннотация.** Авторами разработана стратегия выбора рационального аппаратурно-технологического оформления процесса сушки (без проведения прямых исследований по сушке материала на лабораторных или опытных сушилках) на основе комплексного анализа материалов как объектов сушки с использованием принципа соответственных состояний и данных по кинетике сушки типовых модельных материалов.

**Ключевые слова:** сушка, объект, классификация, аппаратура.

**Анотація.** Авторами розроблена стратегія вибору раціонального аппаратурно-технологічного оформлення процесу сушіння (без проведення прямих досліджень по сушці матеріалу на лабораторних або досвідчених сушарках) на основі комплексного аналізу матеріалів як об'єктів сушки з використанням принципу відповідних станів і даних з кінетики сушіння типових модельних матеріалів.

**Ключові слова:** сушка, об'єкт, класифікація, апаратура.

**Summary.** The authors have developed a strategy for choosing a rational hardware and technological design of the drying process (without conducting direct research on material drying in laboratory or experimental dryers) based on a comprehensive analysis of materials as drying objects using the principle of corresponding states and data on drying kinetics of typical model materials.

**Key words:** drying, object, classification, equipment.

Как известно, сушка является самым распространенным и самым энергоемким процессом в химической и других отраслях промышленности, а также в сельском хозяйстве [1-4; 8; 11-14].

Для выбора рационального аппаратурного оформления процесса сушки до сих пор большинством разработчиков используется

традиционный метод проведения экспериментальных исследований по сушке каждого материала на лабораторных и опытных моделях разных типов аппаратов. Это связано с огромными затратами времени, материалов, труда. Нами разработана и успешно реализуется стратегия выбора рационального аппаратурно-технологического оформления процесса сушки без проведения прямых исследований по сушке материала на лабораторных или опытных сушилках на основе комплексного анализа материалов как объектов сушки с использованием принципа соответственных состояний и данных по кинетике сушки типовых модельных материалов.

Для выбора типовых модельных материалов необходима классификация материалов как объектов сушки. Такая классификация разработана на основе сорбционно-структурных характеристик, ответственных за диффузионное сопротивление в процессе сушки, и обобщенного технологического показателя, характеризующего адгезионно-когезионные свойства высушиваемого материала. Разработке классификации предшествовал комплексный анализ материалов как объектов сушки, который показал, в частности, что энергия связи влаги с материалом является балансовым, а не кинетическим фактором, если в системе отсутствует «тепловой голод». Если же к высушиваемому материалу подводится недостаточно количество тепла, энергия связи влаги с материалом становится кинетическим фактором и отражается на кривой кинетики сушки материала [7-10]. В подавляющем большинстве случаев (если нет технологических ограничений по интенсивности сушки) можно обеспечить подвод к высушиваемому материалу достаточного количества тепла, исключаяющее явление «теплого голода» (например, при сушке во взвешенном слое).

Фактором, определяющим кинетику сушки, является диффузионное сопротивление, которое зависит от распределения пор в материале по

размерам. Показателем, однозначно определяющим принадлежность материала к определенному классу, является критический диаметр пор — наименьших по размеру пор, из которых по технологическим условиям надо удалять влагу. Предложена методика определения критического диаметра пор из кривых распределения пор по радиусам, полученных по десорбционной ветви изотермы сорбции-десорбции с использованием уравнения Кельвина-Томсона, которая в отличие от большинства известных методик (ртутная порометрия, рентгено-структурный анализ и др.) пригодна не только для гидрофобных, но и для гидрофильных материалов, так как определяет не чисто геометрический, а эффективный радиус пор с учетом взаимодействия поверхности пор с удаляемой влагой. Полученный таким образом критический диаметр пор является показателем сложности технологической задачи и наибольшего диффузионного сопротивления в процессе сушки данного материала. Для каждого класса классификационной таблицы выбираются типовые материалы, проводится их детальный комплексный анализ как объектов сушки, и определяются скорости удаления влаги из всех групп пор в соответствии с известной классификацией пор по размерам. Таким образом, был осуществлен переход от статики к кинетике сушки, используя принцип соответственных состояний. В последнее время классификационная таблица была усовершенствована за счет приведения ее в соответствие с классификацией пор по радиусам; для каждого класса указан диффузионный критерий Био (для связи с другими классификациями, например, классификацией НИИХИММАШа). Ниже представлен вариант классификационной таблицы (табл. 1) для дисперсных материалов, где кроме основных параметров указано наличие или отсутствие в материале пылевой фракции (для правильного формирования состава сушильной установки) [6-10; 14].

Процесс сушки большинства материалов во многом определяется гидродинамической обстановкой в сушильном аппарате. При оптимальном применении гидродинамические режимы получили название активных гидродинамических режимов, которые являются эффективными режимами, то есть сочетают интенсивность с экономичностью и высоким качеством готового продукта. В связи с этим необходимо отметить, что не существует априори активных гидродинамических режимов, так как высокий уровень относительных скоростей взаимодействующих фаз не обеспечивает его высокую эффективность, если гидродинамический режим не соответствует технологической задаче по сушке данного материала. Поэтому суть активного гидродинамического режима не в интенсивности, а в эффективности процесса с учетом не только самого сушильного аппарата, но и всей сушильной установки в целом. Именно поэтому в последнее время термин «активный гидродинамический режим» мы нередко заменяем термином-синонимом «эффективный гидродинамический режим» [3; 5; 10; 14].

Таблица 1

**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 адгезионно-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.			3	1			
		1.2.2.					2		
$Bi' < 1$	Второй	2.1.1.	10-100			1		Широкопористые	3,0-5,0 с

		2.1.2.		1	2		2	материалы со слабо связанной влагой (Испарение жидкости из жидкой пленки)			
		2.2.1.				1					
		2.2.2.			3		2				
		2.3.1.				1					
		2.3.2.			4		2				
$Vi' < 10$	Третий	3.1.1.	8-6	2	2		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	
$Vi' < 20$	Четвертый	4.1.1.	6-4	3	2	1	2	Тонкие поры со свободной и связанной влагой (Кнудсеновская и поверхностная диффузия)	0,5-2,0 мин		
		4.1.2.									
		4.2.1.									1
		4.2.2.								3	
$Vi' \geq 20$	Пятый	5.1.1.	4-2	4	2	1	2	Микропоры со связанной влагой (поверхностная диффузия)	2-20 мин		
		5.1.2.									
$20 < Vi' < 30$	Шестой	6.1.1.	Менее 2	5	1	До 1 мм	-	Ультрамикропоры соизмеримые с размерами молекул (твердотельная диффузия)	2-20 мин		

Источник: разработка авторов

Нами разработан метод сравнительной оценки активности гидродинамических режимов с использованием эксергетического анализа по величине эксергетических коэффициентов полезного действия [5-8; 12; 14]. Этот метод позволяет правильно выбрать гидродинамический режим сушки.

Необходимо сопоставлять полезный эффект, получаемый в результате использования активных гидродинамических режимов, с затратами на их реализацию. В качестве показателя, характеризующего термодинамическую эффективность используемых методов активизации гидродинамической обстановки в аппарате, целесообразно использовать отношение эксергетических коэффициентов полезного действия до и после применения указанных методов или для альтернативных технических

решений различных авторов. В этом случае активным (применительно к конкретному материалу и аппаратурному оформлению) следует считать гидродинамический режим, для которого указанный показатель достигает наибольшего значения. Эксергетический КПД является комплексным показателем для оценки гидродинамического режима и степени загрязнения окружающей среды тепловыми выбросами, которые характеризуют экологическую чистоту сушильной установки. Следует подчеркнуть, что попытка использовать обычный тепловой баланс существенно искажает картину. Так нами показано, что тепловой баланс завышает реальные энергетические расходы на 30-50% по сравнению с корректным эксергетическим анализом [4; 8; 12-16].

Уравнение, связывающее эксергетические характеристики взаимодействующих материальных потоков, может быть получено на основе балансовых соотношений

$$G_m \Delta h_m + W r_n = \alpha F \Delta t_{cp} \quad (1)$$

$$G_m \Delta u_m = \beta F \Delta x_{cp} \quad (2)$$

Для сушильного агента, рассматриваемого в виде смеси абсолютного сухого газа и пара, на основе закона аддитивности можно записать

$$\Delta h_c = c \Delta t_c + h_n \Delta x_c \quad (3)$$

Из уравнений (1) - (3) следует

$$\Delta h_c = G_m \Delta h_m \frac{c}{\delta \alpha F} + \frac{c \beta}{\delta \alpha} \Delta x_{cp} h_n + \Delta x_{cp} h_n \quad (4)$$

Введем безразмерные комплексы

$$Le = c \beta / \alpha, \quad g = G_c / G_m, \quad n = \beta F / G_c \quad (5)$$

Комплекс  $Le$  характеризует соотношение тепловых потоков, обусловленных теплообменом между сушильным агентом и влажным материалом, и теплотой, транспортируемой парами влаги. Безразмерную

переменную процесса  $g$  можно рассматривать как относительную скорость сушильного агента,  $n$  - как аналог числа единиц переноса по газовой фазе.

С учетом безразмерных переменных (5) преобразуем уравнение (4):

$$\Delta h_c = \frac{Le}{gn} \Delta h_m + \left(1 + \frac{Le}{\delta}\right) \Delta x_{cp} h_n \quad (6)$$

где:  $\Delta x_{cp}$ - средняя движущая сила процесса массопереноса;  $\Delta x_c$ - изменение влагосодержания сушильного агента;  $\alpha$ - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $\beta$ - коэффициент массопереноса, кг/(м<sup>2</sup>·с),  $\delta = \Delta t_{cp} / \Delta t_c$ .

Учитывая, что в сушильной установке с активным гидродинамическим режимом наибольшим изменениям подвергается термическая составляющая эксергии взаимодействующих потоков, можно воспользоваться эксергетической температурной функцией для перехода от тепловых характеристик этих потоков к эксергетическим. В этом случае из уравнения (6) следует

$$\frac{\Delta e_n}{\Delta e_c} = \eta_e = \frac{1 - Le \Delta e_m}{(1 + Le / \delta) \Delta x_{cp} gn \Delta e_c} \quad (7)$$

Входящие в соотношение (7) безразмерные переменные  $Le$ ,  $n$  связаны с кинетическими коэффициентами  $\alpha$  и  $\beta$ . Последние определяются степенью активности гидродинамической обстановки в аппарате.

Соотношение (7) позволяет путем сопоставления значений эксергетического КПД для различных вариантов активных гидродинамических режимов сделать вывод о целесообразности произведенных энергозатрат, тем самым выбрать оптимальный вариант, соответствующий наибольшему значению этого показателя.

Для более полной характеристики сушильной установки необходимо ввести в показатель  $\eta_e$  составляющую, учитывающую энергозатраты,



обусловленные выделением высушенного продукта из газовой фазы или на пылеочистку, независимо от того, проводится это процесс непосредственно в сушильном аппарате или вне его.

Тогда получим

$$\eta_{\circ} = \frac{K_1 \eta_e + K_2 \eta_{cen}}{2} \quad (8)$$

Коэффициенты  $K_1$ ,  $K_2$  характеризуют относительный уровень ущерба, наносимого окружающей среде тепловыми и пылевидными загрязнениями.

$$\eta_{cen} = \frac{\eta_z + \eta_{ул}}{2} \quad (9)$$

$$\eta_z = \frac{\ln(p^{ex} - \Delta p) - \ln p_0}{\ln p^{ex} - \ln p_0} \quad (10)$$

где  $p^{ex}$ ,  $p_0$ ,  $\Delta p$  - давление соответственно: на входе в аппарат; окружающей среды и гидравлическое сопротивление аппарата.

Результаты эксергетического анализа показывают, что активные гидродинамические режимы являются ресурсосберегающими не только в отношении металла и производственных площадей (за счет малых размеров аппаратов) [4], но и в отношении удельного расхода энергии [3; 12-14]. Разработанный метод оценки активности гидродинамических режимов позволяет среди альтернативных технических решений выбрать объективно наиболее эффективное. Используя этот метод нами для каждого класса приведенной выше классификационной таблицы рекомендован типовой аппарат, реализующий те гидродинамические режимы, которые являются активными при сушке материалов данного класса.

Важнейшим фактором, определяющим пригодность типового аппарата для обработки материалов данного класса, является гарантия

обеспечения требуемого времени пребывания материала в аппарате, то есть обеспечения получения высушенного продукта при любой начальной влажности (в пределах реальной технологии). Особенно это важно при сушке дисперсных материалов во взвешенном слое, где гидродинамика определяет среднее время пребывания материала в аппарате и спектр времени пребывания отдельных частиц, то есть равномерность сушки. Реальные материалы имеют сложную структуру и содержат поры различных размеров, поэтому продолжительность их сушки будет зависеть от количественного соотношения пор различных диаметров.

Время опорожнения  $i$ -той группы пор

$$\tau_i = \frac{1}{\bar{N}_i} \frac{\rho_{жс}}{\rho_m} \int_{d_i}^{d_{i+1}} f_V(d) d(d) = K_i \Delta U_i \quad (11)$$

где  $\rho_m$ ,  $\rho_{жс}$  – 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  $\bar{N}_i$ , удаления жидкости из  $i$ -ой группы пор;  $\Delta U_i$  – содержание жидкости в материале, соответствующее заполнению пор диаметром от  $d_i$  до  $d_{i+1}$ .

Продолжительность  $\tau''$  удаления жидкости из микрокапилляров материала, имеющего разнопористую структуру, можно определить из соотношения

$$\tau'' = \sum_{i=1}^{i=n} \tau_i = \sum_{i=1}^{i=n} K_i \Delta U_i \quad (12)$$

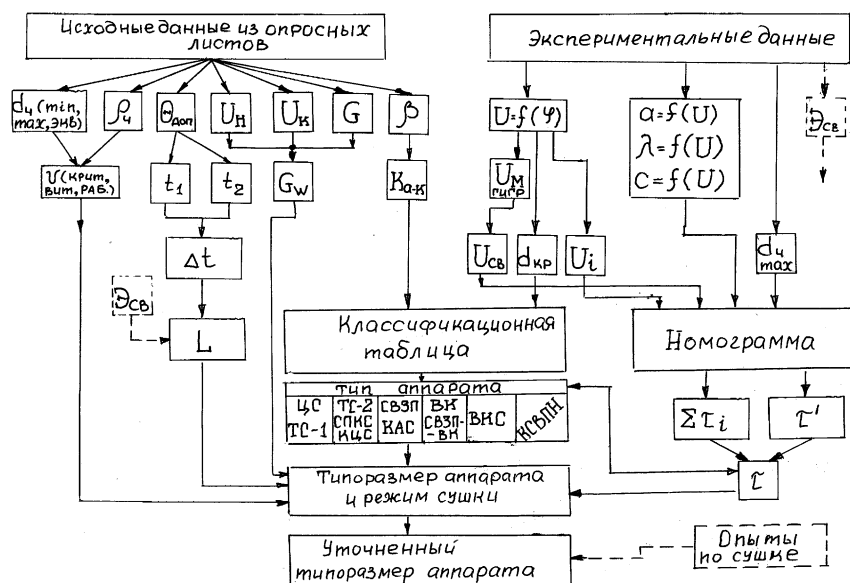
Тогда общее время сушки пористого материала

$$\tau = \tau' + \tau'' = \tau' + \sum_{i=1}^{i=n} K_i \Delta U_i \quad (13)$$

где  $\tau'$  – время удаления свободной влаги, обычно составляющее при активных гидродинамических режимах от долей секунды до 2-3 секунд.

Средняя скорость удаления влаги из каждой группы пор определена по кинетике сушки модельных материалов с разнородной структурой (например, стирола МСН) в реальных аппаратах при разных температурах сушильного агента. Полученные данные в совокупности с величинами  $\tau'$ , определенными нами с учетом термических характеристик по разработанной методике [1; 3; 4; 8; 14], позволили составить номограмму для расчета кинетики сушки любого материала без проведения опытов по сушке этого материала в реальных сушилках. Сопоставление расчетной кинетики с экспериментальной для 15 различных материалов подтвердило эффективность данного метода.

Порядок выбора сушильных аппаратов на основе комплексного анализа материала как объекта сушки с использованием классификационной таблицы и расчетной номограммы представлен на рис. 1 [4; 8]. Разработанная стратегия выбора была реализована применительно к сушке дисперсных материалов, так как до 80% подлежащих сушке материалов находятся в дисперсном состоянии.



**Рис. 1. Порядок выбора сушильных аппаратов на основе комплексного анализа материала как объекта сушки**

Источник: разработка авторов с сотрудниками

В алгоритме выбора (рис. 1) использованы обозначения:  $d_{ч_{экв}}$ ,  $d_{ч_{max}}$  – эквивалентный и максимальный диаметр частиц;  $\rho_ч$  – плотность частиц материала;  $\theta_{доп}$  – допустимая температура нагрева материала;  $v_{вит}$  – скорость критическая, витания, рабочая частиц материала;  $U_n$ ,  $U_k$ ,  $U_i$ ,  $U_{mg}$  – содержание жидкости в материале: начальное, конечное, соответствующее заполнению  $i$ -й группы пор, максимальное гигроскопическое содержание жидкости;  $G$ ,  $G_w$  – производительность аппарата по сухому продукту и по испаренной жидкости;  $\beta$  – угол естественного откоса;  $K_{а-к}$  – ранг адгезионно-когезионного коэффициента;  $L$  – расход сушильного агента;  $d_{кр}$  – критический радиус пор;  $\mathcal{E}_{св}$  – энергия связи влаги с материалом;  $U = f(\varphi)$  – изотермы сорбции и десорбции;  $a = f(U)$ ,  $\lambda = f(U)$ ,  $c = f(U)$  зависимости температуропроводности  $a$ , теплопроводности  $\lambda$ , теплоемкости  $c$  материала от содержания жидкости;  $\tau$ ,  $\tau'$ ,  $\Sigma\tau_i$  – время сушки общее, время прогрева материала и суммарное время удаления жидкости из  $i$  групп пор, сушилки: циклонная (ЦС), комбинированные циклонная (КЦС) и аэрофонтанная (КАС), виброкипящего слоя (ВКС), труба-сушилка одноступенчатая (ТС-1) и двухступенчатая (ТС-2), проходящего кипящего слоя (СПКС), комбинированная сушилка безуносного типа с закрученными потоками (СВЗП-ВК) (встречные закрученные потоки – вихревая камера), кипящего слоя с вибрирующими поверхностями нагрева, погруженными в слой (КСВПН).

Возрастающее применение при сушке дисперсных материалов находят различные гидродинамические режимы взвешенного слоя, отличающиеся высокой интенсивностью процесса. При оптимальном применении такие режимы являются активными гидродинамическими режимами.

Для каждого класса разработанной классификационной таблицы дисперсных материалов как объектов сушки, приведенной выше, рекомендованы типовые аппараты, реализующие те гидродинамические режимы, которые являются активными при сушке материалов данного класса.

В связи с проблемой пылеочистки в последние годы были разработаны многофункциональные безуносные аппараты со встречными закрученными потоками и управляемой гидродинамикой (ВЗП) [1-5; 7-8], которые могут быть рекомендованы в качестве нового поколения типовых аппаратов для материалов с критическим диаметром пор  $60 \text{ \AA}$  (с первого до четвертого класса материалов по приведенной классификации). Возможности сушилок ВЗП ограничены малым временем пребывания материала в аппарате, однако, в последнее время [3; 6; 10] удалось за счет нового гидродинамического режима - вращающегося кольцевого слоя увеличить время пребывания высушиваемого материала в аппарате в 5-6 раз, что позволило на несколько тысяч наименований расширить ассортимент материалов, высушиваемых в СВЗП.

Для микропористых материалов (четвертая класс) в качестве типовых аппаратов рекомендуются комбинированные безуносные сушилки, в которых для увеличения времени обработки материала в верхней части типовых сушилок СВЗП пристраиваются дисковые вихревые камеры. Для ультрамикропористых материалов, рекомендуются сушилки с виброкипящим слоем материала (предпочтительно сушилки с погруженными в слой вибрирующими поверхностями нагрева).

Таким образом, разработана стратегия выбора рационального аппаратурно-технологического оформления процесса сушки, реализованная применительно к сушке дисперсных материалов во взвешенном слое. Выбор рационального аппаратурно-технологического оформления процесса сушки любого дисперсного материала сводится к

определению типового аппарата, рекомендованного для соответствующего класса дисперсных материалов, а для определения класса достаточно знать критический диаметр пор и ранг адгезионно-аутогезионного коэффициента данного материала. Комплекс работ, включающий исследования и внедрения с использованием указанной стратегии, отмечен премией Правительства РФ в области науки и техники.

### **Литература**

1. Гидромеханические и диффузионные процессы /Б.С. Сажин, Л.И. Гудим, В.А. Реутский. М., Легпромбытиздат, 1988. - 200 с.
2. Вихревые пылеуловители /Б.С. Сажин, Л.И. Гудим, В.А. Реутский. М, Химия, 1995. - 144 с.
3. Научные основы термовлажностной обработки дисперсных и рулонных материалов / Б.С. Сажин, В.Б. Сажин. М.: Химия, 2012. – 776 с.
4. Сажин, Б.С. Научные основы техники сушки / Б.С. Сажин, В.Б. Сажин. - Москва: Наука. 1997. - 448 с.
5. Сажин, В.Б. Выбор и расчёт аппаратов с взвешенным слоем / В.Б. Сажин, М.Б. Сажина. - М.: РосЗИТЛП. 2001. - 336 с.
6. Сажин, В.Б. Научные основы стратегии выбора эффективного сушильного оборудования / В.Б. Сажин, Б.С. Сажин. = М.: Химия, 2013, 544 с., ил.
7. Сажин, В.Б. / В.Б. Сажин, М.Б. Сажина // Сушка в закрученных потоках: теория, расчёт, технические решения. М.:РосЗИТЛП. 2001. – 324 с.
8. Сажин В.Б. Научные основы техники сушки дисперсных материалов при эффективных гидродинамических режимах взвешенного слоя. Дисс... доктора технич. наук. М., РХТУ, 2000. - Т. 1 – 617 с. – Т. 2. – 203 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: Химия и хим. технология, Том 48. - №5. - 2005. - С. 99-104.
10. Сажин, В.Б. Анализ основных характеристик влажных материалов как объектов сушки при рациональном выборе сушильного оборудования / В.Б. Сажин, М.Б. Сажина, Б.С. Сажин // Известия вузов: Химия и химическая технология. - Том 48. - №12. - 2005. - С. 98-104.
11. Сушка и промывка текстильных материалов: теория и расчет процессов / Б.С. Сажин, В.А. Реутский. М., Легпромбытиздат, 1990.- 224 с.
12. Эксергетический анализ работы промышленных установок / Б.С. Сажин, А.П. Булеков, В.Б. Сажин. М.: Изд-во МТИ. 2000. – 297 с.
13. Энергосберегающие процессы и аппараты текстильных и химических предприятий / Б.С. Сажин, М.П. Тюрин. М. - 2001. – 311 с.
14. V. Sazhin and V. Sazhin Scientific Principles of Drying Technology /New York -Connecticut-Wallingford (U.K.): Begell House Inc. - 2007. - 506 pp.
15. Сажин, В.Б. 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.
16. Сажин В.Б. Моделирование процесса сушки твёрдого материала в фонтанирующем слое / В.Б. Сажин и др. // ТОХТ, 1997. - том 31. - №4. - С. 638-653.
17. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М., Химия. – 1984. - 320 с.
18. Эксергетический метод в химической технологии / Б.С. Сажин, А.П. Булеков. М, Химия, 1992. - 208 с.

19. 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.
20. Булеков, А.П. 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.
21. Булеков А.П., Сажин В.Б., Орешкина Е.В. и др. Эксергетические потери в пылеуловителях ВЗП / 11 межд. конф. молодых учёных по химии и химической технологии ("МКХТ-97"): Сб. науч. тр. // под ред. П.Д. Саркисова и В.Б. Сажина. М.: РХТУ, часть 2. - 1997.
22. 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).
23. Дорохов И.Н., Сажин В.Б. Принципы создания отраслевого банка данных кинетических характеристик сыпучих материалов для автоматизированного проектирования сушильных установок с псевдооживленным слоем. - В книге: Методы кибернетики химико-технологических процессов / Тезисы докладов 2 Всесоюзной научной конференции. Баку. – 1987. - часть 1. - С. 133-134.
24. Панова А.Ю., Сажин В.Б. Изучение влияния размеров частиц и их теплофизических свойств на величину продольного перемешивания в аппаратах взвешенного слоя / Успехи в химии и химической технологии. Т. XVII. - № 8 (33). - 2003. - С. 93-99.
25. Метод исследования кинетики сушки сыпучих продуктов в псевдооживленном слое / С.В. Сорокин, В.Б. Сажин // Аппараты с неподвижными и кипящими слоями в хлорной промышленности: Сб. науч. тр./ГосНИИ хлорпроект. М.: НИИТЭхим, 1988. - С. 106-111.



26. Ойгенблик А.А., Сажин В.Б. и др. Моделирование кинетики сушки полидисперсных частиц различной формы (одиночная частица) / Процессы в зернистых средах: Межвуз. сб. науч. тр. Иваново, 1989. - С. 58-62.
27. Сажина М.Б., Углов В.А., Сажин В.Б. и др. Сушилки взвешенного слоя с управляемой гидродинамикой для дисперсных волокнообразующих полимеров / Известия вузов: Технология текстильной промышленности. - №4 (273). - 2003. - С. 92-95.
28. Сажина М.Б., Углов В.А., Сажин В.Б., и др. Выбор эффективной сушильной установки с взвешенным слоем для дисперсных волокнообразующих и текстильно-вспомогательных материалов / Известия вузов: Технология текстильной промышленности. - №5 (274). - 2003. - С. 98-102.
29. Сажин В.Б., Ойгенблик А.А., Корягин Б.А. и др. Моделирование кинетики сушки полидисперсных частиц различной формы / Исследования по химии и химической технологии минеральных удобрений и сырья для их производства: Сб. науч. тр. М.: МХТИ им. Менделеева, 1990. - С. 46-50.
30. Сажин В.Б., Дорохов И.Н. Принцип формализации кинетических характеристик высушенных продуктов для расчёта аппаратов с псевдооживленным слоем сыпучего материала / Повышение эффективности технологических процессов и оборудования в текстильной промышленности и производстве химических волокон и разработка систем пылеулавливания: Межвуз. сб. науч. тр. М.: МТИ им. Косыгина, 1988. - С. 130-132.
31. Сажин В.Б., I. Seldin, Бойцев П.Н. и др. Применение термодиагностических микропроцессорных комплексов для автоматизации научных исследований / Создание и внедрение аппаратов с активными гидродинамическими режимами для

- текстильной промышленности и производства химических волокон: сб. 3 ВНТК. М.: ЦНИИТЭИлегпром. - 1989. - С. 31-32.
- 32.Сажин В.Б., I. Seldin, Ойгенблик А.А. и др. Использование микро-процессорного комплекса "ЛДКК-Рефлекс" для исследования кинетики сушки в режиме автоматизированного эксперимента: Сб. тр. 7 межд. симпозиума по сушке. Польша. Лодзь. - 1991.
- 33.Сажин В.Б., I. Seldin, O. Seldin и др. Автоматизированная экспресс-диагностика прочностных характеристик элементов конструкций из полимерных композиционных материалов: Сб. науч. тр. 6 нац. конф. по механике и технологии композиц. материалов. Болгария. Варна. - 1991.
- 34.Сажин В.Б., Ермишин Ю.М., Сажин В.Б. и др. Исследование математической модели процессов сушки на основе системы дифференциальных уравнений сопряжённого тепло - и массообмена применительно к задачам режимно-конструктивной оптимизации: сб. науч. тр. 2 межд. минского форума по тепло-массообмену. Минск, 1992.
- 35.Сажин В.Б., Сажина М.Б., Сажин В.Б. и др. Расчёт и интенсификация тепло-массообменных процессов химической технологии в текстильной промышленности / Успехи в химии и химической технологии. Т. XVII. № 5 (30). 2003. С. 102-107.
- 36.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 и химической технологии. – XIII. – 5. - 1999. - С. 46-49.
- 37.Сажин В.Б., Фирсаев Ил. Р., Геллер Ю.А. Структурно-механические характеристики дисперсных материалов как объектов сушки / Успехи в химии и химической технологии. - XIV. - 3. - 2000. - С. 83-86.

38. Сажин В.Б., I. Seldinas, O. Seldinas. Анализ теплопроводности для влажных дисперсных материалов / Успехи в химии и химической технологии. - Том XV. - 2001. - №1. - С. 33-37.
39. Сажин Б.С., Акулич А.В., Сажин В.Б. Математ. моделирование движения газа в сепарационной зоне прямоточного вихревого аппарата на основе ( $k_t$ - $\epsilon$ )-модели турбулентности / ТОХТ. – 2001. - Т. 35. - № 5. с. 472-478.
40. Сажин В.Б., I. Seldin, O. Seldin Диагност. компьют. комплекс "НМК-Рефлекс" и его примен. для теплофизич. Исследований / Теплофиз. проблемы пром. производства: Сб. межд. теплофиз школы. Тамбов, 1992.
41. Сажин В.Б., I. Seldinas, O. Seldinas Установка для теплофизического анализа влажных дисперсных материалов импульсным методом плоского источника тепла / Успехи в химии и химической технологии. - Том XV. – 2001. - №1. - С. 37-41.
42. Б.С. Сажин, В.Б. Сажин Стратегия выбора рационального аппаратурно-технологического оформления процесса сушки / Современные энергосберегающие тепловые технологии: Сб. науч. тр. МНПК. Том. 3 Технол. сушки, расчёт и проект. суш. установок. М.: МГАУ. - 2002. - С. 6-13.
43. Сажин В.Б., Сажин Б.С., Сажина М.Б. и др. Оптимизация аппаратурного оформления сушильных процессов в технике взвешенного слоя / Успехи в химии и хим. технологии. - Том XXI. - 2007. - №1 (69). - С. 49-65
44. Сажин Б.С., Сажин В.Б., Отрубянников Е.В. и др. Сушка в активных гидродинамических режимах / ТОХТ. – 2008. - том 42. - №6. - С. 638-653.
45. Сажин Б.С., Дмитриева Л.Б., Сажин В.Б. Влияние пластифицирующего действия воды на проявление адгезионно-

- аутогезионных свойств в процессе сушки гранулированного полиэтилентерефталата / Успехи в химии и химической технологии.- Том XXII. - 2008. - №8 (88). - С. 120-123.
- 46.Сажин Б.С., Чунаев М.В., Сажин В.Б. Термокапиллярный механизм неустойчивости слоя жидкости (Эффект Марангони) / Успехи в химии и химической технологии, 2009. - Т. XXIII. - №3(96). - С. 103-106.
- 47.Сажин, Б.С. Вибрационная сушилка для сыпучих и пастообразных материалов / Б.С. Сажин, О.С. Кочетов, В.Б. Сажин и др. - Патент на изобретение №2312285 от 18.07.2006.
- 48.Сажин, Б.С. Многосекционная вибрационная сушилка / Б.С. Сажин, О.С. Кочетов, В.Б. Сажин и др. - Патент на изобретение №2312287 от 18.07.2006.
- 49.Сажин, Б.С. Сушильный аппарат / Б.С. Сажин, О.С. Кочетов, В.Б. Сажин и др. - Патент на полезную модель №68369 от 14.05.2007.
- 50.Сажин, Б.С. Сушильная установка / Б.С. Сажин, О.С. Кочетов, В.Б. Сажин и др. - Патент на полезную модель №68368 от 14.05.2007.
- 51.Сажин, Б.С. Сушилка для полидисперсных материалов / Б.С. Сажин, О.С. Кочетов, В.Б. Сажин и др. - Патент на полезную модель №68370 от 14.05.2007.
- 52.Сажин, Б.С. Установка для сушки полидисперсных материалов / Б.С. Сажин, О.С. Кочетов, В.Б. Сажин и др.- Патент на полезную модель №68371 от 14.05.2007.
- 53.Сажин, Б.С. Установка для сушки растворов и суспензий в кипящем слое инертных тел / Б.С. Сажин, О.С. Кочетов, В.Б. Сажин и др. - Патент на полезную модель №68665 от 26.06.2007.
- 54.Сажин, Б.С. Установка для сушки жидких материалов в кипящем слое инертных тел. / Б.С. Сажин, О.С. Кочетов, В.Б. Сажин и др. - Патент на полезную модель от 27.08. 2008

55. Сажин Б.С., Сажин В.Б., Сажина М.Б. Активность гидродинамического режима как фактор повышения эффективности процесса сушки во взвешенном слое / *Успехи в химии и химической технологии*. - Том XXII. - 2008. - №6 (86). - С. 111-119.
56. Сажин Б.С., Сажин В.Б. Основные проблемы сушки дисперсных материалов, научно-практический анализ и решение / *Успехи в химии и химической технологии*. - Том XXII. - 2008. - №1 (81). - С. 98-111.
57. Сажин Б.С., Чунаев М.В., Сажин В.Б. Равновесие и конвекция в горизонтальном слое жидкости (Эффект Релея) / *Успехи в химии и химической технологии*, 2009. - Т. XXIII. - №4(97). - С. 49-51.
58. Сажин Б.С., Тюрин М.П., Сажин В.Б. и др. Ресурсосбережение в вихревых аппаратах / *Успехи в химии и химической технологии*, 2011. - Т. XXV. - №1 (117). - С. 122-124.
59. Сажин Б.С., Дмитриева Л.Б., Сажин В.Б. Сорбционная способность и влияние сорбируемой влаги на структуру полиэтилентерефталата / *Успехи в химии и хим. технологии*. - Том XXII. - 2008. - №4 (84). - С. 115-118.
60. Сажин Б.С., Сажин В.Б., Тюрин М.П. и др. Научные основы сушильной техники с активными гидродинамическими режимами / *Успехи в химии и химической технологии*. - Том XXI. - 2007. - №6 (74). - С. 115-123.
61. Сажин Б.С., Дмитриева Л.Б., Сажина М.Б. и др. Особенности реализации процесса сушки гранулята полиэтилентерефталата / *Успехи в химии и химической технологии*. - Том XXII. - 2008. - №9 (89). - С. 121-123.
62. Сажин Б.С., Сажин В.Б. Проблемы сушки дисперсных материалов. (Проблемный доклад) / *Современные энергосберегающие технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) «СЭТТ-2008»*: Сб. Науч. тр. 3 МНПК. Т.2. М: ООО «Франтера». - 2008. - С. 179-191.

63. Сажин В.Б., Сажин Б.С. Устройство для определения теплофизических характеристик дисперсных материалов / *Инновационная наука в глобализующемся мире: Сб. Науч. тр. междунаучно-практ. конф. (Уфа, 5-6.03.2014).*- Уфа: РИО ИЦИПТ, 2014. - 256 с. - С. 279-265.
64. Сажин, В.Б. Создание эффективной сушильной установки и разработка промышленного кода: технологическая задача и её решение для материала как объекта сушки [Текст] / В.Б. Сажин, Б.С. Сажин // *Международный академический вестник (ISSN: 2312-5519).* - №5(11). - 2015. - С. 99-102.
65. Фирсаев Иг. Р., Сажин В.Б., Сажина М.Б. Изучение реологических свойств сыпучих продуктов как объектов сушки / *Успехи в химии и химической технологии.* – XIV. – 3. - 2000. - С. 79-82.
66. Efremov G., Sazhin B., Sazhin V. Calculation of parameters of drying using a combination of microwave and convective heating. *Drying' 98, Proc., vol. C, ZITI Edition, Greece, 1998.* - P. 2129-2133.
67. Drying in Active Hydrodynamic Regimes / B.S. Sazhin, V.B. Sazhin, E.V. Otrubjannikov, and L.M. Kochetov / *Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2008.* - Vol. 42. - No. 6. - pp. 837-851. - Pleades Publishing Ltd., 2008.
68. Sazhin V. & Sazhin B. Application of exergy analysis to reduce the anthropogenic impact on the industrial environment [article] / «Topical areas of fundamental and applied research V» (North Charleston, SC, USA, December, 22-23, 2014): in 2 vv. Vol. 1. - «SPC Academic», North Charleston, SC, USA 29406, 2015. – 233 pp. (ISBN: 978-1-50585-703-0). P. 116-119.
69. Sazhin V. & Sazhin B. Principles classifying materials as processing objects for the processes of drying and washing [article] / «Fundamental science and technology – promising developments V» (North Charleston,

- SC, USA, February, 24-25, 2015): in 2 vv. Vol. 1. - «SPC Academic», 4900 LaCross Road, North Charleston, SC, USA 29406, 2015. – 225 pp. (ISBN: 978-1508657552). - P. 135-140.
- 70.Sazhin V. & Sazhin B. Modeling of drying and washing under the terms of the so-called "balance problems" [article] / «Fundamental and applied science today V» (North Charleston, SC, USA, March, 30-31, 2015): in 3 vv. Vol. 1. - «SPC Academic», 4900 LaCross Road, North Charleston, SC, USA 29406, 2015.- 216 pp. (I-IV+i-vi) (ISBN: 978-1511565684). - P. 113-117.
- 71.Sazhin V. & Sazhin B. Determination of thermal properties of materials as objects of thermal and humidity processing / «Academic science -problems and achievements III» (Moscow, 20-21, Feb. 2014, North Charleston, SC, USA, 20-21, Feb. 2014): in 3 vv. – Vol. 2.- «SPC Academic», 4900 LaCross Road, North Charleston, SC, USA 29406, 2014.- 304pp. (ISBN: 978-1496106537). - P. 231-236.
- 72.Sazhin V. & Sazhin B. Evaluation of thermodynamic activity in the apparatus of the weighted layer during the heat and mass transfer processes / 21 century: fundamental science and technology VIII: Proceedings of the Conference. North Charleston, 25-26.01.2016, in 3 vs / Vol. 1. - North Charleston, SC, USA:CreateSpace, 2016, p. 224 (ISBN: 978-1523740369). – P. 97-102.
- 73.Sazhin V. & Sazhin B. Definition of system specifications for materials that are subject to drying / 21 century: fundamental science and technology XI: Proceedings of the Conference. North Charleston, 23-24.01.2017, in 2 vs. Vol. 1—North Charleston, SC, USA:CreateSpace, 2017. - P. 257, 153-156.
- 74.Sazhin V. B., Sazhin B. S. Basis of classification of materials as objects of drying / Збірник центру наукових публікацій Велес за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції: частина 1 "Зимові

наукові читання", м Київ: збірник статей (рівень стандарту, академічний рівень). - К.: Центр наукових публікацій, 2017. 128с. ISSN 5836-4978. - С. 86-97.

- 75.Sazhin V. & Sazhin B. Drying of disperse materials with quasi-static conditions / Academic science - problems and achievements XI: Proceedings of the Conference. North Charleston, 6-7.02.2017, in 2 vv. Vol. 1.—North Charleston, SC, USA:CreateSpace, 2017. - P. 218,142-145. (ISBN 978-1543046090).
- 76.Sazhin V. & Sazhin B. Innovative implementation strategy of industrial drying processes in a fluidized bed / 21 century: fundamental science and technology VIII: Proceedings of the Conference. North Charleston, 23-24.01.2014, in 3 vs /Vol. 2 — North Charleston, SC, USA:CreateSpace, 2014, pp. 241 (ISBN: 978-1495417696). – P. 154-157.