

На правах рукописи

Войновский Александр Александрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ С УЧЕТОМ
ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
МАТЕРИАЛА**

05.17.08 Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре кибернетики химико-технологических процессов
Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева

Научный руководитель	Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры кибернетики химико- технологических процессов РХТУ им. Д.И. Менделеева Меньшутина Наталья Васильевна
Официальные оппоненты	Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой процессы и аппараты химической и нефтехимической промышленности Московского государственного открытого университета Ефремов Герман Иванович Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии неорганических веществ РХТУ им. Д.И. Менделеева Конькова Татьяна Владимировна
Ведущая организация	Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Защита диссертации состоится «28» февраля 2013 г. в 13.00 часов
на заседании диссертационного совета Д 212.204.03 в РХТУ им. Д.И. Менделеева по
адресу: 125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9, в конференц-зале.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре
РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Автореферат диссертации разослан «__» января 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.204.03



А.В. Женса

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Распылительная сушка относится к массовым процессам химической, пищевой, химико-фармацевтической отраслям промышленности, поскольку позволяет получать из растворов, суспензий, эмульсий и паст конечный продукт в виде хорошо растворимого порошка или гранулята. Распылительная сушка может проводиться в большом диапазоне рабочих температур, процесс характеризуется малым временем контакта материала с горячим теплоносителем и высокой производительностью по испаренной влаге.

Качество высушенных продуктов, особенно термо- и ксеролабильных, часто сильно зависит не только от температуры нагрева и остаточного влагосодержания, но и от скорости их нагрева и обезвоживания в процессе сушки. Это вызвано сильной, обычно экспоненциальной, зависимостью происходящих при сушке химических, физико-химических и структурно-реологических превращений от текущего состояния капли/частицы.

Разработка математического описания, позволяющего прогнозировать не только изменение параметров состояния материала (температуры и влажности), но и изменение показателей качества продуктов в процессе сушки является актуальной задачей.

Работа проводилась в соответствии с заданием Министерства образования и науки РФ в рамках задания Минобрнауки России на проведение научных исследований по тематическому плану. Номер темы 1.13.10 «Разработка теоретических основ процессов получения наноструктурированных микропорошков для химической и фармацевтической отраслей промышленности» 2011-2014 гг.

Цель работы заключается в моделировании процессов распылительной сушки с учетом изменения качественных характеристик продуктов. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие научно-технические задачи:

- Проведение экспериментальных и аналитических исследований распылительной сушки объектов различной природы: биопродукт – биосуспензия, содержащая дрожжи, обогащенные каротиноидами; органический продукт – эмульсия «масло в воде» (МВ); неорганический продукт – раствор алюмосиликата.

- Проведение регрессионного анализа результатов исследований с целью выявления ключевых факторов, оказывающих наибольшее влияние на получение материала с высокими показателями качества.
- Математическое описание и проведение вычислительных экспериментов для нахождения изменения таких характеристик материала, как температура и влагосодержание от времени пребывания в аппарате.
- Выбор типа уравнения деградации, определение входящих в него констант и расчет на его основе изменения показателей качества материала на основании экспериментальных и расчетных массивов данных.
- Развитие алгоритмов передачи многомерных массивов данных и стыковки программных модулей, необходимых для расчета сложных процессов химической технологии.
- Масштабирование процесса распылительной сушки с использованием разработанного математического описания и выдача рекомендаций по ведению процесса в аппарате промышленного масштаба с учетом прогнозируемого качества продукта.

Научная новизна. Развита теоретические положения процесса сушки распылением и предложена методология расчетов, оценивающая изменение параметров качества материала в зависимости от свойств исследуемого объекта (энергии деактивации и других параметров), а также от: 1 – температуры; 2 – температуры и влагосодержания; 3 – температуры и скорости изменения влагосодержания; 4 – температуры и скоростей изменения влагосодержания, температуры.

Развита алгоритмы передачи многомерных массивов данных и стыковки программных модулей, необходимых для расчета сложных процессов химической технологии.

Проанализировано влияние технологических параметров на сохранение антиоксидантных свойств, что крайне важно для многотонажного производства биологически активных добавок.

Выявлено влияние состава, условий приготовления эмульсии и параметров процесса на характеристики конечного продукта (эффективность инкапсуляции и

индекс окисленности). Изучено поведение оболочки микрокапсулы в процессе ее обезвоживания.

Проанализировано влияние параметров процесса на сохранение активного алюминия в продукте при получении сухих несслеживаемых форм с точки зрения минимизации энергетических затрат.

Развита методология прогнозирования поведения объекта на основе совокупности методов регрессионного анализа; механики сплошных сред; алгоритма обработки массивов данных для нахождения зависимостей, характеризующих проведение процесса в целом; метода многопараметрической оптимизации с использованием имитационного метода случайного поиска (метод роя пчел).

Практическая ценность. Проведен комплекс исследований процесса распылительной сушки для трех объектов, включая последующий регрессионный анализ и оптимизацию. Получены данные по кинетике сушки для объектов исследования.

Разработан программный модуль расчета изменения качественных характеристик материала в процессе распылительной сушки: антиоксидантной активности, индекса окисленности, количества активного алюминия.

На основании расчетных данных были даны рекомендации по организации процесса на установке промышленного масштаба, обеспечивающие достижение высокого качества рассматриваемых объектов исследования.

Апробация. Основные результаты диссертационной работы были изложены на Международной конференции молодых ученых по химии и химической технологии, Москва, 2009 г.; Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях», Белгород, 2010 г.; Европейском симпозиуме по информационным технологиям и управлению «ESCAPE», Краков, Искье, Халкидики, 2009 - 2011 г.; Международной конференции по сушке «NDC», Рейкьявик, Хельсинки, 2009, 2011 г.; Международной конференции в рамках X Московского Международного салона инноваций и инвестиций, Москва, 2010 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано **13** печатных работ, в том числе **4** работы в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией.

Объём и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 146 наименований, 3 приложений. Общий объём составляет 174 страницы печатного текста, включая 21 таблицу и 65 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена и обоснована актуальность поставленной задачи.

В первой главе проведен обзор современных областей применения технологии распылительного высушивания; эффектов, возникающих в процессе обезвоживания материалов; а так же существующих подходов к математическому описанию гидродинамики, тепло- и массообмена, распределению компонентов, кинетики деградации в результате теплового и осмотического эффектов, возникающих на уровне единичного включения.

В соответствии с целью работы и на основании результатов анализа литературы была сформулирована постановка задачи исследования и намечены этапы ее решения.

Вторая глава описывает комплекс экспериментальных и аналитических исследований, регрессионный анализ полученных результатов в соответствии с блок-схемой, представленной на рис. 1. Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке Mini Spray Dryer B-290, BÜCHI. В случае получения эмульсии использовался погружной гомогенизатор Ultra Turrax T18, IKA.

Объект исследования	Биосуспензия	Водно-масляная эмульсия	Раствор алюмосиликата
План эксперимента	Ортогональный план второго порядка 25 экспериментов	Ортогональный план Плакетта-Бермана 12 экспериментов	Композиционный план второго порядка 15 экспериментов
Размерность плана	4 фактора 5 уровней	10 фактора 2 уровня	3 фактора 3 уровня
Основные показатели процесса	Антиоксидантная активность Остаточное влагосодержание Энергозатраты	Эффективность инкапсуляции Остаточное влагосодержание Индекс окисленности Потери продукта за счёт адгезии вещества	Количество активного алюминия Потери продукта за счёт адгезии вещества Энергозатраты

Рис. 1. Блок-схема комплексных исследований

Экспериментальные исследования распылительной сушки биосуспензии дрожжей проводились в соответствии с ортогональным планом второго порядка

(рис. 1). В качестве варьируемых параметров были выбраны: Z_1 – температура сушильного агента на входе в аппарат ($130 - 210$ °C); Z_2 – расход сушильного агента ($27 - 35$ м³/ч); Z_3 – расход сжатого воздуха ($0.428 - 1.07$ м³/ч); Z_4 – скорость подачи биосуспензии ($0.35 - 0.78$ кг/ч). При построении плана параметры были переведены в безразмерный масштаб (X).

Основными анализируемыми качественными параметрами были Y_1 – антиоксидантная активность (АА) и Y_2 – остаточное влагосодержание (ОВ). Регрессионный анализ позволил найти следующие зависимости:

$$Y_1 = 5.41 \cdot X_1 - 5.12 \cdot X_3 - 5.05 \cdot X_1 \cdot X_3 + 8.92 \cdot X_3^2 + 9.28 \cdot X_4^2$$

$$Y_2 = 0.0181 - 0.0023 \cdot X_1 - 0.0017 \cdot X_2 + 0.0070 \cdot X_3^2 + 0.0028 \cdot X_4^2$$

Было установлено, что значения локальных оптимумов не совпадают, в связи с чем, по методу утопической точки была найдена точка компромисса. В таблице 1 приведены расчетные и экспериментальные значения, найденные в локальных оптимумах и точке компромисса.

Таблица 1

Координаты оптимумов и результаты

Тип оптимума	Параметры		Прогноз		Эксперимент		Электро-энергия, кДж
			АА, %	ОВ, %	АА, %	ОВ, %	
Локальный (АА _{max})	$X_1=1.546$ $X_3=-1.546$	$X_2=-1.546$ $X_4=-1.546$	68.1	4.06	57.51	2.61	2299
Локальный (ОВ _{min})	$X_1=1.546$ $X_3=0$	$X_2=1.546$ $X_4=0$	29.07	1.19	20.54	1.93	1831
Точка компромисса	$X_1=1.546$ $X_3=-1.546$	$X_2=1.546$ $X_4=0.4$	44.73	2.91	43.42	2.18	1602

В результате были рекомендованы следующие параметры: $Z_1 = 210$ °C, $Z_2 = 35$ м³/ч, $Z_3 = 0.428$ м³/ч, $Z_4 = 0.626$ кг/ч. Выбор параметров велся исходя из максимального значения АА, минимальных энергозатрат и остаточного влагосодержания.

Экспериментальные исследования по *двухстадийной инкапсуляции липофильных функциональных компонентов* путем приготовления эмульсии (стадия 1) и ее распылительной сушки (стадия 2) проводились в соответствии с ортогональным планом Плакетта-Бермана. Факторы и уровни их варьирования были выбраны: Z_1 – доля масляной фазы ($20 - 40$ %); Z_2 – доля гуммиарабика ($25 - 75$ %);

Z_3 – время выдерживания гуммиарабика (0 – 12 ч); Z_4 – скорость гомогенизации (3000 – 5000 об/мин.); Z_5 – время гомогенизации (5 – 10 мин.); Z_6 – вязкость масляной фазы ($15.5 \cdot 10^{-6}$ – $60.6 \cdot 10^{-6}$ м²/с); Z_7 – расход сжатого воздуха (473 – 601 л/ч); Z_8 – скорость подачи эмульсии (0.36 – 0.6 кг/ч); Z_9 – температура сушильного агента (170 – 200 °С); Z_{10} – расход сушильного агента (22.5 – 27.5 м³/ч). В соответствии с планом было произведено 12 экспериментов, а так же анализ промежуточных и конечных продуктов. Основными качественными параметрами были приняты: Y_6 – эффективность инкапсуляции, Y_7 – производительность по целевому продукту, Y_5 – остаточное влагосодержание и Y_8 – индекс окисленности. Дополнительно определялись размер капель масла в эмульсии (Y_1), а так же размер частиц продукта и соответствующие индексы полидисперстности (Y_3, Y_4).

На рис. 2 приведены фотографии поверхности частиц из которых видно, что в местах близкого расположения масляной фазы при высушивании образуются впадины. При приближении видно, что вся поверхность покрыта мелкими порами за исключением впадин, где имеются большие трещины. В этих местах произошло вскипание масляной фазы, что и привело к образованию больших трещин, разрывов и потерь активного компонента.

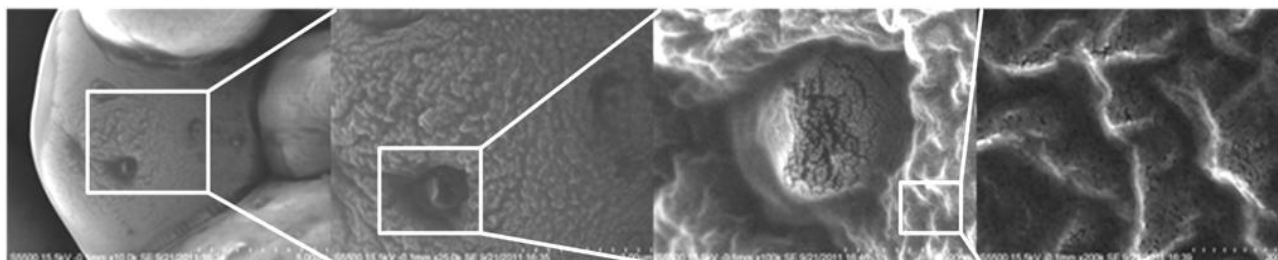


Рис. 2. Фотографии частицы при разном приближении, полученные методом сканирующей электронной микроскопии

Был проведен регрессионный анализ полученных данных. На рис. 3 отображено влияние процесса на характеристики промежуточного, целевого продукта. Стрелками показано, увеличивает или уменьшает параметр исследуемую характеристику, при этом цвет стрелки отвечает за то, положительное или отрицательное влияние оказывает данный эффект, а номер – интенсивность его влияния.

На основании регрессионного анализа были даны рекомендации по проведению промышленного эксперимента двухстадийной инкапсуляции липофильных

функциональных компонентов.

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
Y ₁	↑2	↓3			↓4	↓1	Отрицательное влияние			
Y ₂	↑3	↓2				↓1	Положительное влияние			
Y ₃			↓3	↑2		↑4	↓1			
Y ₄	↓6		↓4	↑2		↑5	↓1		↑3	
Y ₅	↓3	↑2	↑5			↑1			↓4	↑5
Y ₆	↓4	↑2			↓3			↓1	↓5	↑6
Y ₇	↑1	↓6	↓4			↓5		↓3	↑2	↑1
Y ₈	↑1	↓4			↑4	↑5		↑3	↑2	↓4

Рис. 3. Влияние параметров процесса на характеристики промежуточного и целевого продукта при инкапсуляции

Исследование распылительной сушки алюмокремниевого коагулянта-флокулянта (АККФ) проводилось в соответствии с композиционным планом второго порядка. Для приготовления АККФ использовали нефелиновый концентрат. В ходе эксперимента варьировали: Z₁ – расход сушильного агента (24 – 38 м³/ч), Z₂ – температуру сушильного агента (130 – 170 °С) и Z₃ – скорость подачи раствора АККФ (0.324 – 0.540 кг/ч).

При производстве сухих форм коагулянтов достижение низкого остаточного влагосодержания, не требуется. Достаточно получить дисперсный, неслеживающийся продукт, хорошо растворяющийся в воде, следовательно, достаточно удалить только поверхностную влагу. Предварительные исследования показали, что первый период сушки водного раствора коагулянта заканчивается при достижении остаточного влагосодержания 0.15 г влаги/г материала. С другой стороны, требуется организовать распылительную сушку таким образом, чтобы качественные характеристики конечного продукта – выход сухого продукта (избежать налипания продукта в процессе сушки на стенках аппарата) и количественное содержание активного алюминия – были наилучшими, а энергозатраты на сушку – минимальными.

Регрессионный анализ позволил найти следующие зависимости:

$$Y_1 = 0.614 + 0.009 \cdot X_2 + 0.011 \cdot X_1 X_2 - 0.015 \cdot X_1^2 + 0.030 \cdot X_3^2$$

$$Y_2 = 12.414 + 1.044 \cdot X_1 - 1.383 \cdot X_1 X_2 + 1.118 \cdot X_2 X_3 - 1.638 \cdot X_3^2 - 1.243 \cdot X_1 X_2 X_3$$

Поскольку координаты локальных оптимумов не совпадали, был применён

метод утопической точки для свёртки многокритериальной задачи. В результате были получены следующие координаты точки компромисса: $Z_1 = 24 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Z_2 = 170 \text{ }^\circ\text{C}$, $Z_3 = 0.54 \text{ кг/ч}$. Регрессионный анализ позволил выявить ключевые факторы, оказывающие наибольшее влияние на сохранение параметров качества материала в процессе распылительной сушки; выдать рекомендации по организации процесса на установке лабораторного масштаба.

Для построения математического описания были проведены исследования *кинетики сушки* для трех выбранных объектов при разных температурных режимах. Результаты данных исследований представлены во второй части главы 2.

Полученные кривые для биосуспензии дрожжей имели ярко выраженные линейные участки, соответствующие первому периоду сушки и заканчивающиеся при достижении остаточного влагосодержания 0.35 г/г. Далее сушка протекает во втором периоде.

В случае водно-масляных эмульсий исследовались растворы не содержащие масляную фазу. Было отмечено, что при низкой температуре увеличение доли гуммиарабика препятствует отводу влаги из материала. При более высоких температурах данный эффект не проявляется. Сушка проходит в первом и втором периоде, однако период удаления связанной влаги для данного объекта выражен более сильно.

Кривые сушки раствора алюмокремниевого коагулянта-флокулянта характеризуются первым периодом, что позволяет пренебречь описанием периода удаления связанной влаги при математическом моделировании.

Третья глава посвящена математическому описанию, получению расчетных массивов данных, характеризующих поведение материала в аппарате, стыковке с массивом экспериментальных данных и их совместной обработке с целью выбора для каждого из объектов типа уравнения деградации, определяющего изменение параметров качества материала, а так же входящих в него констант.

Блок-схема методологии выбора типа уравнения деградации и определения входящих в него констант представлена на рис. 4. Для трех серий экспериментов в соответствии с начальными условиями были проведены расчеты по уравнениям математической модели и получены массивы расчетных данных.

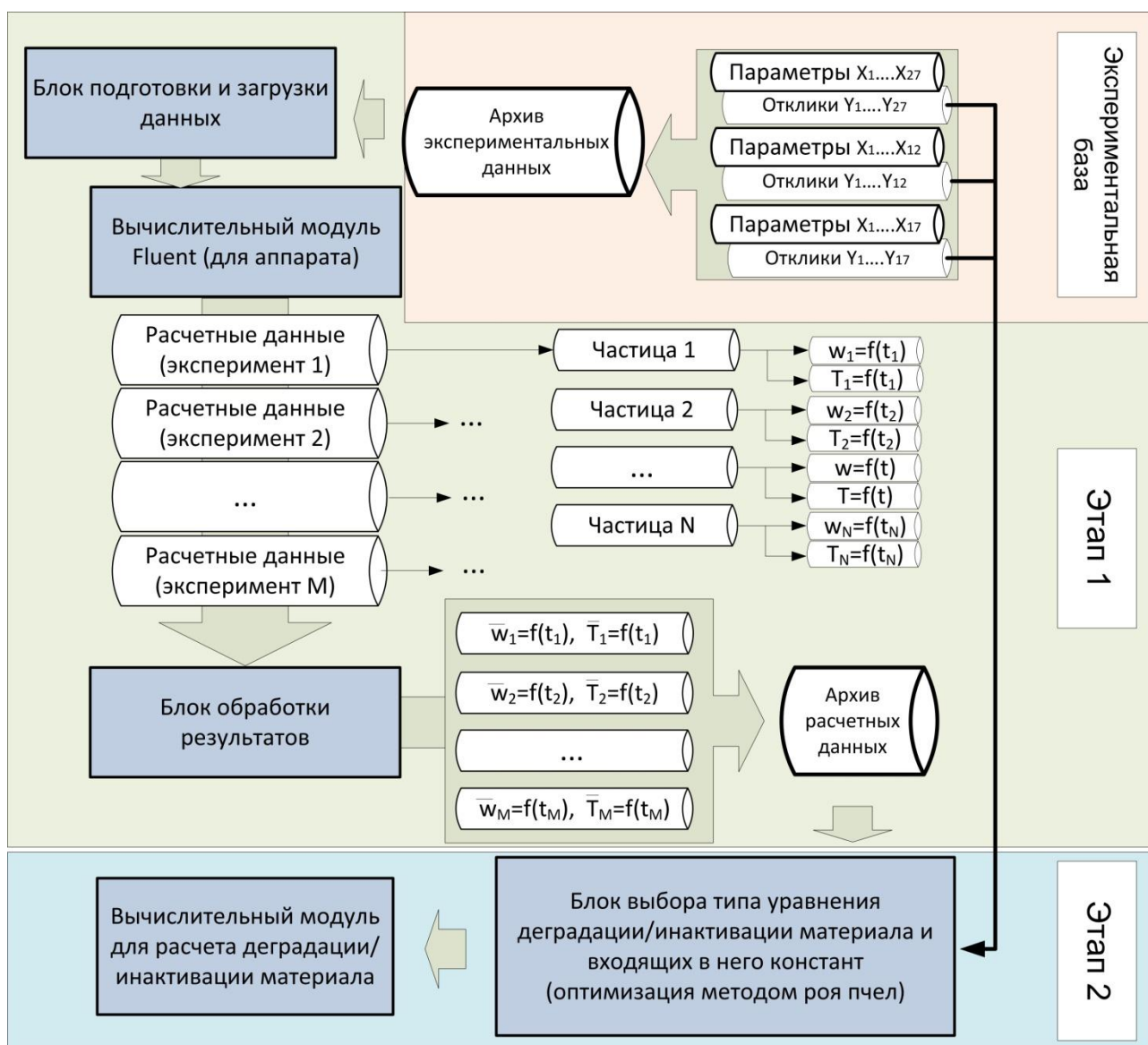
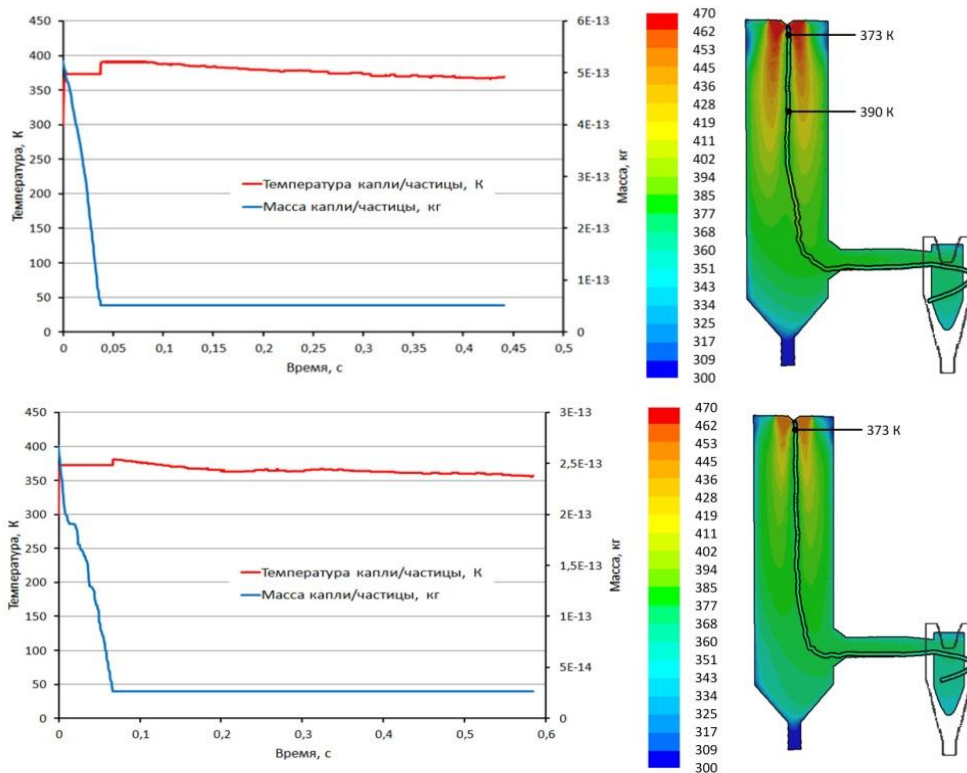


Рис. 4. Блок-схема методологии выбора и построения кинетической модели деградации материала

На рис. 5 в качестве примера приведены результаты вычислительного эксперимента по сушке биосуспензии: температурные профили непрерывной фазы и частицы; двумерные графики изменения влагосодержания и температуры последней. Полученные массивы расчетных данных, содержащие информацию об изменении влагосодержания и температуры материала в процессе распылительной сушки (рис. 5), были экспортированы из программного пакета Fluent и использованы для выбора типа уравнения деградации материала и входящих в него констант. При экспорте данных производилось их усреднение (рис. 4). При этом вначале определялось среднее время пребывания капли/частицы в аппарате путем усреднения времени

пребывания каждой частицы. Далее из потока данных выбиралась частица, имеющая наиболее близкое значение к рассчитанной средней величине, и в массив данных передавались значения изменения температуры и влагосодержания по времени пребывания в аппарате для этой капли/частицы.



*Рис. 5.
Результаты
расчета
распылительной
сушки
биосуспензии
дрожжей:
1 – $Z_1=469$ K;
 $Z_2=33$ м³/ч;
 $Z_3=0.5$ м³/ч;
 $Z_4=0.42$ кг/ч;
2 – $Z_1=443$ K;
 $Z_2=31$ м³/ч;
 $Z_3=1.1$ м³/ч;
 $Z_4=0.57$ кг/ч*

Для описания снижения качественных характеристик материала в процессе сушки можно применить следующее уравнение:

$$\frac{dC}{dt} = -k_d(T, X) \cdot C,$$

где C – отслеживаемый параметр качества материала; k_d – кинетическая константа скорости деградации/инактивации.

Из анализа литературных данных для кинетической константы скорости деградации/инактивации были выбраны следующие выражения:

$$k_d = k_0 \exp\left(-\frac{E_d}{R_g T}\right) \quad k_d = k_0 \left(1 + b \left|\frac{dX}{dt}\right|\right) \exp\left(-\frac{E_d}{R_g T}\right)$$

$$k_d = k_0 \cdot \exp(a \cdot X) \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{R_g T}\right) \quad k_d = k_0 \left(1 + a \left|\frac{dT}{dt}\right|\right) \left(1 + b \left|\frac{dX}{dt}\right|\right) \exp\left(-\frac{E_d}{R_g T}\right)$$

Кинетическая константа является функцией от природы материала, влагосодержания, температуры, а в ряде случаев так же от скорости изменения этих параметров. Оптимизация проводилась с использованием имитационного метода

случайного поиска (метод роя пчел). Входными параметрами являлись условия, при которых проводились экспериментальные исследования и расчетные данные об изменении температуры и влагосодержания материала. Критерием оптимальности, являлась функция, показывающая расхождение экспериментально найденного значения отслеживаемой характеристики $C_{\text{эксп}}$, от ее расчетного значения $C_{\text{расч}}$.

Для каждого из объектов исследования были определены многопараметрической оптимизацией следующие выражения и входящие в него значения констант:

$$k_d = 0.827 \left(1 - 4.586 \left| \frac{dT}{dt} \right| \right) \left(1 + 1.042 \left| \frac{dX}{dt} \right| \right) \exp \left(- \frac{5414}{R_g T} \right) \quad \text{биосуспензия}$$

$$k_d = -8.793 \left(1 + 1.642 \left| \frac{dX}{dt} \right| \right) \exp \left(- \frac{7214}{R_g T} \right) \quad \text{водно-масляная эмульсия}$$

$$k_d = 2.152 \left(1 + 0.057 \left| \frac{dX}{dt} \right| \right) \exp \left(- \frac{2375}{R_g T} \right) \quad \text{коагулянт}$$

В соответствии с рекомендованным для каждого объекта исследований видом уравнения деградации и найденными значениями констант был создан расчетный модуль, позволяющий прогнозировать изменения параметров качества материала (антиоксидантная активность, индекс окисленности и количество активного алюминия) в процессе распылительной сушки в широком диапазоне параметров. На рис. 6-8 в качестве примера приведены расчетные данные об изменении параметров качества материала в процессе распылительной сушки для выборки из 10 частиц.

Как видно из рис. 6-8 параметры ведения процесса оказывают значительное влияние на скорость изменения качественных характеристик. Рассогласование расчетных данных от экспериментальных составило 6-12%.

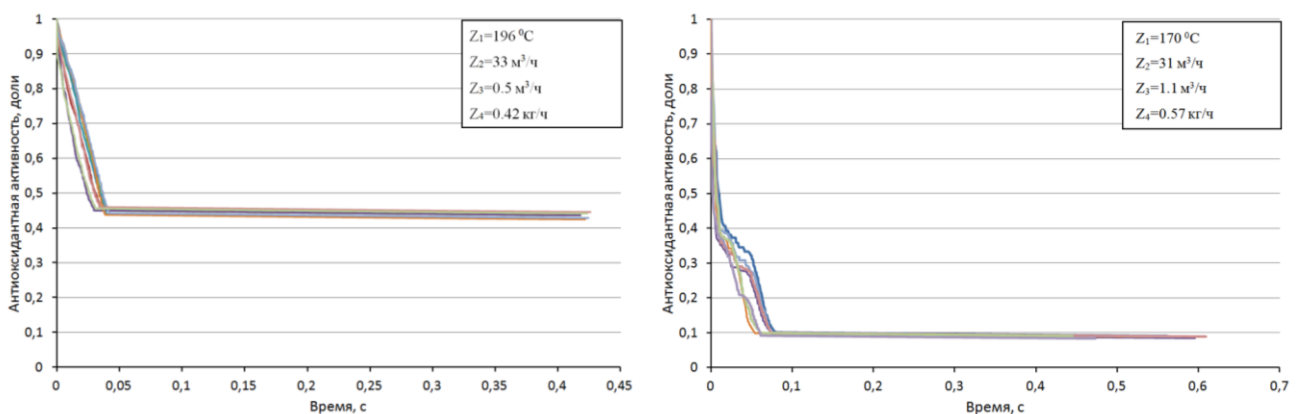


Рис. 6. Прогнозируемое снижение антиоксидантной активности в процессе сушки

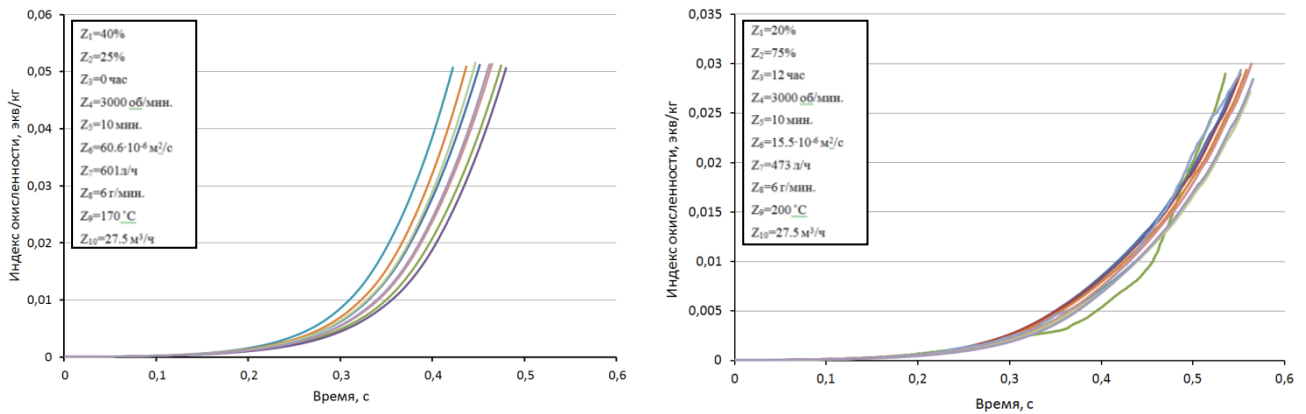


Рис. 7. Прогнозируемое увеличение индекса окисленности в процессе сушки

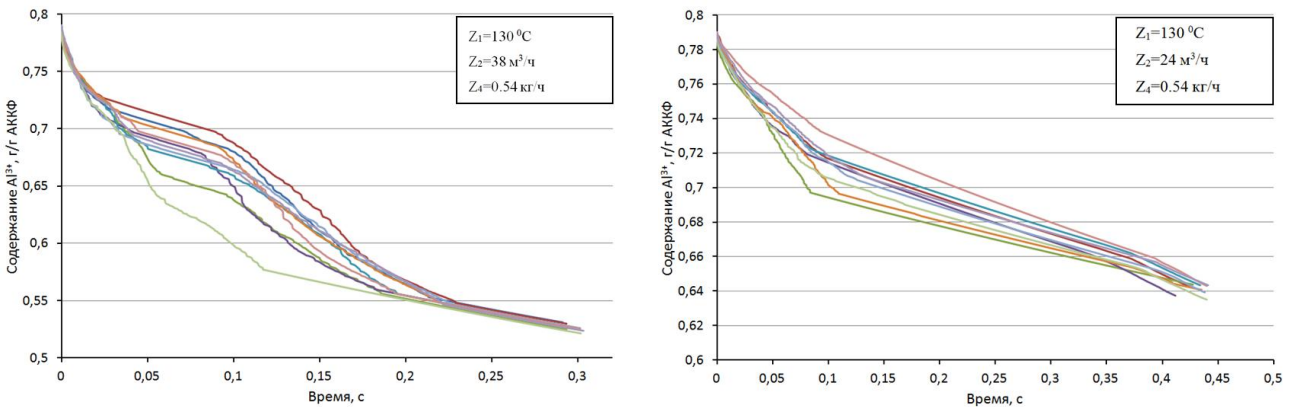


Рис. 8. Прогнозируемое снижение концентрации Al^{3+} в процессе сушки

Таким образом, разработанное математическое описание, определяющее изменения параметров качества материала в процессе распылительной сушки, при его совместном решении с системой уравнений гидродинамики, теплообмена и кинетики сушки позволяет осуществлять масштабирование процесса.

Четвертая глава посвящена применению разработанного математического описания для расчета аппарата промышленного масштаба и выдачи рекомендаций по ведению процесса. На рис. 9 представлена схема аппарата Minor Spray Dryer.

В автореферате приведен пример расчета процесса сушки биосуспensionии дрожжей в установке промышленного масштаба. Полученные профили температур для непрерывной фазы и графики изменения температуры и массы частицы для трех температур и расхода материала 4 кг/ч приведены на рис. 10.

На основании вычислительных экспериментов были определены параметры ведения процесса, путем нахождения минимума функции оптимизации которая может быть записана в виде $F(Z_1^{BX}, Z_2^{BX}) = a_1 R_1(Z_1^{BX}, Z_2^{BX}) + a_2 R_2(Z_1^{BX}, Z_2^{BX})$, с учетом ограничения по $OB \leq 3\%$, где Z_1^{BX} – температура сушильного агента, Z_2^{BX} – расход

биосуспении. $R_1 = (1 - C(Z_1^{BX}, Z_2^{BX}))$, где C – значение антиоксидантной активности; $R_2 = \frac{E(Z_1^{BX}, Z_2^{BX})}{E_{max}}$, где E – энергозатраты. Весовые коэффициенты принимают следующие значения $a_1 = 0.6$, $a_2 = 0.4$.

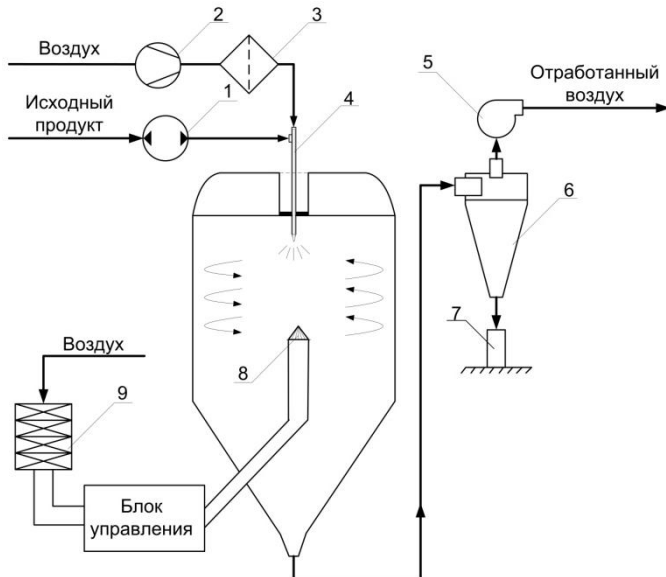


Рис. 9. Принципиальная схема Minor Spray Dryer:
 1 – перистальтический насос;
 2 – компрессор; 3 – воздушный фильтр; 4 – пневматическая форсунка; 5 – вентилятор;
 6 – циклон; 7 – емкость для сбора продукта; 8 – патрубок для ввода теплоносителя, снабженный газораспределительным узлом;
 9 – калорифер

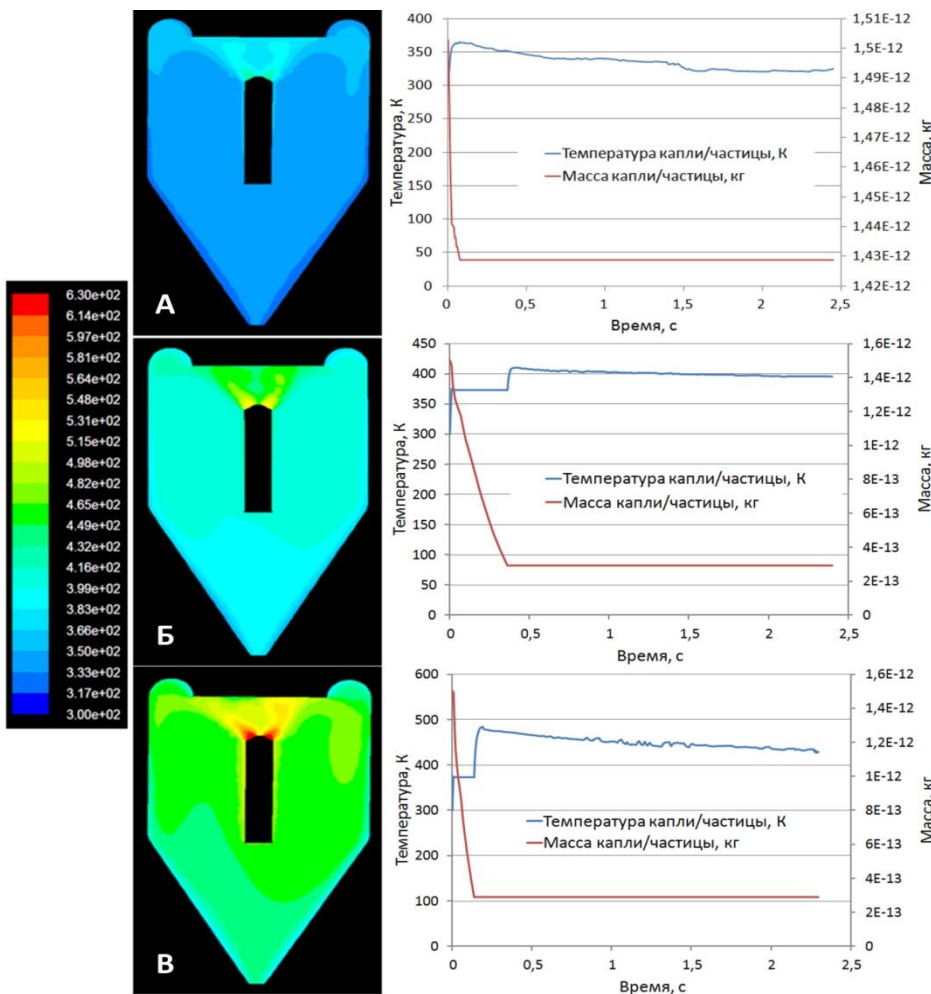


Рис. 10. Результаты расчета распылительной сушки биосуспении дрожжей в аппарате Minor Spray Dryer:
 А – 423 К;
 Б – 523 К;
 В – 623 К

На рис. 11 приведены графики отображающие изменение ОВ (рис. 11А),

антиоксидантной активности (рис. 11Б) и удельных энергозатрат (рис. 11В) от параметров ведения процесса. Расчет производился с шагом по температуре 50 °С и с шагом по расходу биосуспензии 1 кг/ч.

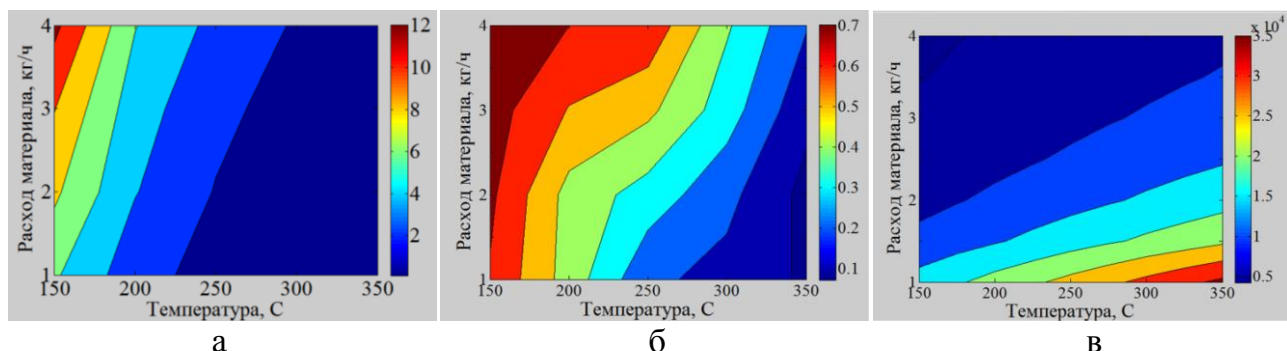


Рис. 11. Изменение остаточного влагосодержания, антиоксидантной активности и энергозатрат от параметров ведения процесса

Были найдены оптимальные условия ведения процесса: расход материала – 4 кг/ч; температура сушильного агента на входе в аппарат – 250 °С. Данные условия обеспечивают низкое остаточное влагосодержание продукта (менее 3%), сохранение антиоксидантных свойств продукта (не менее 60% от начального значения); низкие энергозатраты на обезвоживание 1 кг материала (не более 7000 кДж).

Аналогично были определены оптимальны параметры сушки водно-масляных эмульсий и раствора АККФ. Для распылительной сушки водномаслянных эмульсий: расход материала – 2.2 кг/ч; температура сушильного агента на входе в аппарат – 150 °С. Для раствора АККФ: расход материала – 4 кг/ч; температура сушильного агента на входе в аппарат – 150 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. На базе обширного комплекса экспериментальных и аналитических исследований распылительной сушки трёх объектов проведён регрессионный анализ влияния параметров ведения процессов распылительной сушки на качественные характеристики получаемых продуктов.

2. Выявлены ключевые факторы, оказывающие наибольшее влияние на сохранение качественных характеристик продукта и даны рекомендации по организации процесса на установке лабораторного масштаба.

3. Дано математическое описание и проведена серия вычислительных экспериментов, позволившая получить массив данных об изменении характеристик

материала (температуры и влагосодержания) по времени пребывания в аппарате.

4. Разработан алгоритм стыковки больших массивов экспериментальных и расчётных данных для их последующей обработки.

5. Проведена обработка экспериментальных и расчетных массивов данных и для каждого из объектов исследования, выбран тип уравнения деградации материала, определяющего изменение параметров качества материала (антиоксидантной активности, индекса окисленности, количества активного алюминия), и значений входящих в него констант с помощью метода многопараметрической оптимизации.

6. Разработан программный модуль расчета изменений параметров качества материала в процессе распылительной сушки.

7. Даны рекомендации по организации процесса на установке промышленного масштаба для каждого из объектов исследований, обеспечивающие достижения высокого качества продукта.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Меньшутина Н. В. Гордиенко М. Г. Войновский А. А. Исследование двухстадийной инкапсуляции липофильных функциональных компонентов // Вестник МИТХТ. 2012. Т. 7. №2. С. 21-25.

2. Menshutina N. V. Gordienko M. G., Voynovskiy A. A. Optimization of spray drying of biomass in consideration of product quality, specific energy consumption and losses // 21th European Symposium on Computer Aided Process Engineering: Proceedings of Symposium, электр. ресурс (CD-ROM). 2011. P. 5.

3. Menshutina N. V., Voynovskiy A. A., Gordienko M. G., Alves S. V. Spray-Drying of Carotenoid-Enriched Compositions for Nutraceutical Production // 5th Nordic Drying Conference: Proceedings of Conference, электр. ресурс (CD-ROM). Helsinki. Finland. 2011. 4p.

4. Войновский А. А. Исследование влияния распылительной сушки на качественные характеристики биомассы *Rhodotorula Rubra* // Материалы международной научно-практической конференции «Фармацевтические и медицинские технологии». 2011. С. 483.

5. Lebedev E. A., Voynovskiy A. A., Matasov A. V., Menshutina N. V. Dispersion Process Modeling And Equipment Design // 20th European Symposium on Computer Aided Process

Engineering: Proceeding of Symposium, электр. ресурс (CD-ROM). 2010. P. 1859-1864.

6. Меньшутина Н. В., Гордиенко М. Г., Лебедев Е. А., Войновский А. А. Применение CFD-моделирования для решения задач химической технологии // Химическая промышленность сегодня. 2010. №6. С. 44-51.

7. Войновский А. А., Лебедев Е. А., Меньшутина Н. В. Разработка оборудования для процесса получения микрочастиц диспергированием // ММТТ-23 – Сб. научных трудов XXIII Международная научная конференция. 2010. Т.3. С. 105-108.

8. Гордиенко М. Г., Войновский А. А., Суясов Н. А., Червякова О. П. Получение дисперсных материалов, обогащенных каротиноидами // Инновационные материалы и технологии в химической и фармацевтической отраслях промышленности: Сборник докладов международной конференции с элементами научной школы для молодёжи. 2010. С. 47-49.

9. Menshutina N., Troyankin A., Kozlov A., Voinovskiy A. Quality-oriented drying process design // АСHEMA – 29th International Exhibition-Congress on Chemical Engineering, Environmental Protection and Biotechnology: Proceedings of Congress. Frankfurt am Main. Germany. 2009. 2 p.

10. Voynovskiy A., Lebedev E., Gordienko M., Menshutina N. and Alves-Filho O. Particle Dispersion Modeling in Spray Drying // 4th Nordic Drying Conference: Proceedings of Conference, электр. ресурс (CD-ROM). Reykjavik. Iceland. 2009. 10 p.

11. Войновский А. А., Лебедев Е. А. Использование технологии CFD для моделирования процесса распылительной сушки // Успехи в химии и химической технологии. Том XXIII. №1. 2009. С. 44-49.

12. Alexander Troyankin, Anton Kozlov, Alexander Voynovskiy and Natalia Menshutina. Quality by design approach in drying process organization // 19th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. 2009. Vol. 26. P. 291-296.

13. Гордиенко М. Г., Кручинина Н. Е., Кузин Е. Н., Войновский А. А. Оптимизация процесса получения отвержденных форм алюмокремниевого флокулянта-коагулянта для применения в очистке сточных вод // Безопасность в техносфере. 2012. № 4. С. 21-25.