Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева

На правах рукописи

T

## ЛЕБЕДЕВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ НАНО- И МИКРОЧАСТИЦ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

## АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Работа выполнена в Российском химико-технологическом университете имени Д.И. Менделеева

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор Меньшутина Наталья Васильевна Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева профессор кафедры кибернетики химико-технологических процессов
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Лабутин Александр Николаевич Ивановский государственный химико-технологический университет заведующий кафедрой технической кибернетики и автоматики ИГХТУ
	кандидат технических наук Матасов Алексей Вячеславович Российский химико-технологический

университет имени Д.И. Менделеева начальник управления информационных технологий

Ведущая организация – ФГУП «ИРЕА»

Защита состоится «20» декабря 2012 года в 11-00 на заседании диссертационного совета Д 212.204.03 при РХТУ им. Д.И. Менделеева (125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9) в актовом зале имени А.П. Бородина.

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

Автореферат диссертации разослан «17» ноября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.204.03

AR

(Женса А.В.)

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее время микропорошки и порошки на основе микроинкапсулированных частиц находят всё большее применение в различных областях. Большую привлекательность имеет применение таких материалов в качестве мезапористых сорбентов для высокопроизводительной жидкостной хроматографии, матриц-носителей катализаторов, для производства ингаляционных форм лекарственных препаратов, в качестве мягких абразивных компонентов для косметологии и препаратов для диагностики и при операциях, при металлизации поверхностей плазменным напылением и т.д. Однако получение частиц с размерами до 30 мкм в настоящее время представляется возможным либо с использованием технологии помола, либо путём диспергирования жидкости и последующей сушки образующихся капель. Процесс помола обладает недостатком в сравнении с диспергированием, заключающимся в образовании частиц несферической формы. В то время как за последние три десятилетия было изобретено огромное количество видов диспергирующих устройств, обладающих различными характеристиками.

Работа выполнялась в соответствии с заданием Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы»: ГК № 02.513.11.3359 «Индустриализация технологий получения наночастиц и наноструктурированных материалов».

<u>Цель работы</u> заключается в моделировании и разработке процесса получения сферических нано- и микрочастиц диспергированием. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие научно-технические задачи:

1. Проведён анализ существующих методов и устройств для диспергирования жидкостей, на основании которого был сделан выбор диспергирующего устройства, позволяющего получать минимальный диаметр частиц и обеспечить их узкое распределение по размерам.

2. Разработана математическая модель, отражающая гидродинамику процесса диспергирования и кинетику сушки, позволившая провести большой вычислительный эксперимент и оценить влияние конструкционных параметров

камеры на движение потоков газа и частиц, подобрать конструкцию газораспределительных элементов, решить проблему отделения нано- и микрочастиц от газовой фазы.

3. На основании результатов расчётов по уравнениям модели разработана конструкция сушильной камеры, обеспечивающая наименьшую степень осаждения влажных частиц материала на стенках камеры, поверхностях форсунки и газораспределительных элементах, а также создан пакет проектно-конструкторской документации, по которому изготовлен экспериментальный экземпляр сушильной камеры.

4. Проведён ряд экспериментальных работ в аппарате собственной конструкции, включающем разработанную сушильную камеру, с использованием однопотоковых и двухпотоковых ультразвуковых форсунок и разных типов пылеосадительных устройств.

Научная новизна. Впервые разработан процесс получения нано- и микрочастиц, а также микроинкапсулированных частиц с использованием метода ультразвукового диспергирования, подтверждённый заявкой на патент. Полученные с использованием данного метода порошки обладают рядом уникальных характеристик, включающих чрезвычайно узкий гранулометрический состав порошков, сферичность частиц и т.д. Разработанный процесс позволяет получать порошки как на основе веществ устойчивых к тепловому воздействию, так и термолабильных.

Разработана математическая модель для описания гидродинамики сушильного агента, траектории движения частиц дисперсной фазы, а также протекающих тепло- и массообменных процессов, с учётом влияния дисперсной фазы на сушильный агент. Данная модель позволяет рассчитывать изменение скоростей газовой и твёрдой фаз, их температуры и скорость сушки в каждой точке аппарата, и визуализировать полученные результаты. Предложенная модель может использоваться как для исследования процесса и выбора оптимальных технологических параметров, так и для проектных расчётов нового оборудования с тщательным анализом влияния конструкции на течение процесса.

Получены закономерности движения нано- и микрочастиц в газовом потоке для различных гидродинамических режимов.

Проанализированы особенности эксплуатации ультразвуковых форсунок, установлена необходимость проведения процесса диспергирования В направлении снизу вверх (с незначительными отклонениями), а также образующихся сравнительно начальные скорости процессе малые В диспергирования частиц.

<u>Практическая ценность.</u> Создан вычислительный комплекс для расчета параметров процесса получения нано- и микрочастиц диспергированием, позволяющий снизить потери дорогостоящего материала, сократить время проведения процесса и количество экспериментальных исследований.

Создан комплект конструкторской документации для разработанной конструкции сушильной камеры.

Создан аппарат собственной конструкции и технологическая схема, включающая данный аппарат.

<u>Апробация.</u> Основные результаты диссертационной работы были доложены на Международной конференции молодых ученых по химии и химической технологии, Москва, 2009 г.; 4ой Международной конференции по сушке «NDC 2009», Рейкьявик, 2009 г.; Международной конференции молодых ученых по химии и химической технологии, Москва, 2010 г.; XX Европейском симпозиуме по информационным технологиям и управлению «ESCAPE20», Искья, 2010 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 2 работы в ведущих рецензируемых журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией, 1 заявка на патент.

<u>Объём и структура работы.</u> Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 147 наименований. Общий объём составляет 178 страниц печатного текста, включая 15 таблиц и 83 рисунков.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена и обоснована актуальность поставленной задачи.

<u>В первой главе</u> представлен обзор современных и классических методов диспергирования жидкостей и их аппаратных реализаций. Особое внимание уделено ультразвуковому методу диспергирования, как наиболее перспективному

в области получения нано- и микропорошков, а также микроинкапсулированных порошков с узким распределением частиц по размерам. Рассмотрены различные методы моделирования в области диспергирования, а также особенности структурообразования частиц в процессе распылительной сушки.

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

второй главе Bo был проведён детальный анализ особенностей ультразвуковых форсунок. Рассматривалась конструкция однопотоковых и двухпотоковых форсунок. В отличие от первого типа, двухпотоковые форсунки позволяют получать микроинкапсулированные частицы. Были установлены температурные диапазоны их эксплуатации. На рисунке 1 представлена принципиальная схема ультразвуковой форсунки производства компании SONO-ТЕК, принцип действия которой состоит в том, что при подаче переменного электрического установленные В корпусе форсунки сигнала на пьезоэлектрические кристаллы за счёт обратного пьезоэлектрического эффекта происходит преобразование электрических колебаний в механические. Эти механические колебания передаются поверхности, на которую поступает диспергируемая жидкость. В результате в слое жидкости возникают стоячие волны, амплитуда которых зависит от мощности подаваемого электрического сигнала. Как только амплитуда колебаний этих волн превышает некоторое критическое значение, происходит отрыв капель от поверхности жидкости.

Были определены ключевые параметры, оказывающие наибольшее влияние на производительность как однопотоковых, так и двухпотоковых форсунок и дисперсный состав факела распыла. Этими параметрами являются: размер выходного отверстия, площадь распыляющей поверхности и свойства диспергируемой жидкости, из которых наибольшее влияние оказывает вязкость.

Проведено экспериментальное исследование по определению начальной скорости диспергируемых частиц для одно- и двухпотоковых форсунок производства компании SONO-TEK с различной рабочей частотой. Исследование проводилось с использованием метода цифровой трассерной визуализации (англ. PIV, Particle Image Velocimetry), заключающемся в получении цифровых изображений потока частиц через известные промежутки времени и

последующей обработке обработке снимков. Было установлено, что в пределах некоторой погрешности начальная скорость частиц составляет 0.2 м/с.





Были выявлены следующие особенности ультразвуковых форсунок, которые необходимо учитывать при их эксплуатации: процесс распыла осуществляется в направлении снизу вверх с отклонениями от вертикали в диапазоне ±20°, начальные скорость и масса частиц очень малы, в результате чего очень велико влияние сушильного агента на частицы.

В третьей главе содержится комплексное математическое описание процесса получения нано- и микрочастиц диспергированием. Модель состоит из двух блоков: блока описывающего поведение непрерывной фазы и блока поведение дисперсной фазы. Уравнения блока описывающего модели, описывающего непрерывную фазу, записаны в координатах Эйлера, в то время как для описания дисперсной фазы использовалась запись уравнений в координатах Лагранжа. Уравнения модели дисперсной фазы были записаны для отдельно взятой частицы. Связь между блоками осуществлялась С использованием методики «частица-источник в ячейке» (Particle-source in cell), неразрывно связанной с методом конечных объёмов, применённым для численного решения системы уравнений модели.

В основе модели, описывающей поведение непрерывной фазы, лежат фундаментальные уравнения гидродинамики, закон сохранения энергии и уравнение переноса концентрации парообразной влаги. Для описания явлений, связанных с наличием турбулентности, была использована модель k-є, основными уравнениями которой являются транспортные уравнения для кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации кинетической энергии.

Модель дисперсной фазы состоит из уравнения сохранения массы частицы, уравнения, описывающего движение частицы дисперсной фазы, представляющее собой второй закон Ньютона, и уравнения сохранения энергии.

При разработке модели были приняты следующие допущения:

- тепло- и массообмен с окружающей средой через стенки аппарата отсутствует;
- непрерывная фаза является несжимаемой жидкостью;
- все частицы диспергированного материала имеют сферическую форму;
- градиент температуры внутри частицы дисперсной фазы равен 0;
- конденсация водяных паров на частицах дисперсной фазы и внутренних поверхностях аппарата не происходит;
- все соударения частиц между собой являются абсолютно упругими.

Список допущений дополнялся в зависимости от решаемых задач.

Система уравнений, описывающая поведение непрерывной фазы, состоит из следующих уравнений:

$$\nabla \cdot (\rho_1 \vec{v}_1) = I_{21} \tag{1}$$

$$\nabla \cdot (\rho_1 \vec{v}_1 \vec{v}_1) = -\nabla P + \nabla \cdot (\tau^{kl}) + \rho_1 \vec{g}$$
<sup>(2)</sup>

$$\rho_1 k \nabla \cdot \vec{v}_1 = \nabla \cdot (\alpha_k \mu_{eff} \nabla k) + G_k + G_b - \rho_1 \varepsilon$$
(3)

$$\rho_1 \varepsilon \nabla \cdot \vec{v}_1 = \nabla \cdot (\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \nabla \varepsilon) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho_1 \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon$$
(4)

$$\nabla \cdot (\rho_1 E \vec{v}_1) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T_1 - h_{nap} \vec{J}) + Q_{ij}$$
<sup>(5)</sup>

$$\nabla \cdot (\rho_1 \vec{v}_1 \omega_{nap}) = -\nabla \cdot \vec{J} + I_{21} \tag{6}$$

где  $\rho_1$  – плотность непрерывной фазы;  $v_1$  – скорость непрерывной фазы;  $I_{21}$  – поток массы, переходящей от дисперсной фазы к непрерывной в результате испарения; P – давление; g – ускорение свободного падения;  $\tau^{kl}$  – тензор напряжений; k – кинетическая энергия турбулентности;  $\varepsilon$  – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности;  $G_k$  – изменение кинетической энергии турбулентности;  $G_b$  – изменение кинетической энергии турбулентности, благодаря действию силы

Архимеда;  $\alpha_k$  и  $\alpha_{\varepsilon}$  – обратные эффективные числа Прандтля для k и  $\varepsilon$  соответственно;  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  и  $C_{3\varepsilon}$  – константы;  $\mu_{eff}$  – турбулентная вязкость;  $R_{\varepsilon}$  – ренормализационный член; E – полная энергия;  $T_1$  – температура непрерывной фазы;  $h_{nap}$  – энтальпия парообразной влаги;  $Q_{ij}$  – поток тепла, идущий от или к дисперсной фазе;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности непрерывной фазы;  $\omega_{nap}$  – массовая доля парообразной влаги; J – диффузия парообразной влаги.





Поведение частицы дисперсной фазы описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{dm_{q}}{dt} = -S_{q}LM_{e} \tag{7}$$

$$\frac{d\vec{v}_{q}}{dt} = k_{12}(\vec{v}_{1} - \vec{v}_{q}) + \frac{g(\rho_{q} - \rho_{1})}{\rho_{q}} + \vec{F}$$
(8)

$$m_{u}c_{u}^{p}\frac{dT_{u}}{dt} = \alpha_{k}S_{u}(T_{1}-T_{u}) + \frac{dm_{u}}{dt}r$$
(9)

где t – время; M<sub>в</sub> – молярная масса испаряемой влаги; L – молярный поток

испаряемой влаги с единицы площади поверхности;  $S_{u}$  – площадь поверхности частицы дисперсной фазы;  $v_{u}$  – скорость диспергированной частицы;  $k_{12}$  – коэффициент трения между частицей дисперсной фазы и непрерывной фазой;  $\rho_{u}$ – истинная плотность частицы дисперсной фазы; F – сумма прочих внешних сил;  $c_{u}^{p}$  – удельная теплоемкость частицы дисперсной фазы;  $T_{u}$  – температура частицы дисперсной фазы;  $\alpha_{k}$  – коэффициент конвективного теплообмена;  $m_{u}$  – масса частицы дисперсной фазы; r – удельная теплота парообразования.

Система уравнений дополнена граничными, начальными условиями и дополнительными соотношениями.

Принципиальная схема вычислительного комплекса показана на рисунке 2. Представленная схема включает в себя блок задания различных свойств непрерывной и дисперсной фаз, блок создания геометрии модели и генерации первичной расчётной сетки, блок математического описания, расчётный блок, в котором осуществляется численное решение системы уравнений, блоки расчета конструкции сушильной камеры и системы сбора готового продукта и подбора технологических параметров ведения процесса. Суммарно было проведено более 140 расчётов, на которые было затрачено более 750 часов машинного времени на компьютерном кластере.

В четвертой главе приведено описание процесса конструирования сушильной камеры с использованием разработанной математической модели. Конструирование осуществлялось c учётом особенностей эксплуатации ультразвуковых форсунок, рассчитывались следующие характеристические параметры сушильной камеры: высота, диаметр, количество входных патрубков для подачи сушильного агента и их длина. Определялась конструкция внутренних газораспределительных элементов. Анализу были подвергнуты 23 варианта конструкции сушильной камеры (см. таблицу 1), отличающиеся по типу подачи сушильного агента, длиной и количеством входных патрубков, через которые осуществляется подача сушильного агента, наличием или отсутствием внутренних газораспределительных элементов, a также ИХ (элементов) конструкцией.

Для численного решения системы уравнений модели был использован метод конечных объёмов заложенный в программном комплексе Fluent,

требующий разбиения исследуемой геометрии модели трёхмерной расчётной сеткой.

Таблица 1.

Тип подачи	Номер	Описание
сушильного агента	варианта	
Тангенциальный	1.1	С одним входным патрубком без газораспределительных элементов
	1.2	С двумя входными патрубками без газораспределительных элементов
	1.3	С четырьмя входными патрубками без газораспределительных элементов
	1.4	С газораспределительной пластиной с увеличенной плотностью отверстий возле форсунки
	1.5	С газораспределительной пластиной с уменьшенной плотностью отверстий возле форсунки
	1.6	С газораспределительной пластиной без отверстий на переферии
	1.7	С газораспределительной пластиной и наклонными направляющими пластинами
		•••
	1.13	С газораспределительной пластиной и вертикальными направляющими пластинами
Аксиальный	2.1	Без газораспределительных элементов
	2.2	С газораспределительной пластиной с отверстиями только на периферии
	2.3	С газораспределительной пластиной с отверстиями только возле форсунки
	2.4	С газораспределительной пластиной с увеличенной плотностью отверстий возле форсунки
	•••	
	2.10	С удлинённым входным патрубком и газораспределительной пластиной с увеличенной плотностью отверстий возле форсунки

Была применена процедура итеративной адаптации расчётной сетки, заключающаяся в том, что происходит пошаговое увеличение количества ячеек в областях, где характеристики потока изменяются наиболее быстро. Изменение сетки производится на основании данных, полученных на предыдущем шаге. Это позволило резко сократить время счёта при сохранении необходимой точности решения.

В качестве одного из результатов расчётов были получены траектории движения частиц дисперсной фазы (см. рис. 3). Результаты были получены для полидисперсного впрыска (размер частиц изменялся в диапазоне от 300 нм до 25 мкм) и для различных расходов сырьевой смеси (от 4 до 10 мл/мин). В результате анализа полученных данных к дальнейшему рассмотрению были приняты лишь три варианта конструкции, которые обеспечивали наименьшее число столкновений влажных частиц с поверхностями форсунки и сушильной камеры (варианты 1.4, 2.3 и 2.10).



Рис. 3. Траектории движения частиц (а – вар. 1.4, б – вар. 2.3, в – вар. 2.10)

Более тщательный анализ выбранных вариантов конструкции сушильной камеры проводился с использованием графиков зависимости доли налипших влажных частиц на поверхностях форсунки и сушильной камеры от начальной скорости сушильного агента во входном патрубке (см. рис. 4). Из рисунка 4 видно, что для двух вариантов конструкции (1.4 и 2.10) с ростом скорости происходит падение степени осаждения, а для одного (2.3) — незначительное падение и последующий рост. Подобная зависимость для варианта 1.4 (график с квадратными маркерами) может быть объяснена тем, что при увеличении скорости создаётся более стабильный поток с меньшим количеством флуктуаций и некоторой зоной разрежения вдоль оси аппарата, которые препятствуют

оседанию частиц. Однако приемлемая степень осаждения достигалась лишь при скоростях более 3.5 м/с. Для варианта 2.3 (график с ромбическими маркерами) рост степени осаждения, скорее всего, обусловлен большими флуктуациями, возникающими из-за невозможности выравнивания потока во входном патрубке.

Для выбранного варианта конструкции сушильной камеры и с использованием



Рис. 4. Зависимость доли налипшего материала от скорости сушильного агента

разработанного математического описания были подобраны технологических параметров ведения процесса.

При подборе параметров варьировались: скорость сушильного агента в диапазоне от 1 до 4 м/с, оказывающая влияние на эффективность работы системы сбора готового продукта и продолжительность процесса сушки, температура сушильного агента в диапазоне от 313 до 353 К и его влажность в диапазоне от 0.2 до 28 % (при 20°С), которые влияют на продолжительность процесса сушки и энергоэффективность процесса.

Была получена зависимость степени осаждения частиц готового продукта в циклоне от начальной скорости сушильного агента во входном патрубке. Зависимость имеет асимптотический характер и практически достигает своего максимума при скоростях более 3.8 м/с.

Анализ графиков изменения диаметров частиц (рисунок 5) показал, что даже для частиц одной фракции (начальный диаметр частиц равен 10<sup>-5</sup> м) процесс сушки протекает не одинаково.





Профили температуры и относительной влажности сушильного агента (рисунки 6 и 7) в осевом сечении сушильной камеры продемонстрировали, что для частиц, находящихся внутри факела распыла, движущая сила процесса сушки ниже, чем для частиц, располагающихся на периферии. При этом при больших значениях скорости сушильного агента профили более выровнены, что приводит к гораздо меньшему отклонению продолжительности процесса сушки отдельно взятых частиц от среднего значения.



Рис. 6. Профили температуры сушильного агента (а – скорость 1м/с, б – 4м/с)



Рис. 7. Профили влажности сушильного агента (а – скорость 1м/с, б – 4м/с) Таким образом, процесс подбора технологических параметров осуществлялся по следующей схеме: первоначально были исключены все варианты расчётов, которые не обеспечивали завершения процесса сушки до остаточной влажности частиц 0.5% на протяжении 0.95% от всей высоты сушильной камеры, а затем из оставшихся вариантов выбирался тот вариант, который обеспечивал наименьшее относительное отклонение продолжительности процесса сушки отдельно взятых частиц от среднего значения.

Принимая во внимание, что наибольшая эффективность работы системы сбора готового продукта достигается при скоростях более 3.8 м/с (для частиц, лежащих в диапазоне от 300 нм до 25 мкм, и расходов сырьевой смеси – от 4 до 10 мл/мин), были выбраны следующие значения технологических параметров:

скорость сушильного агента — 3.8 м/с, температура сушильного агента — 343К, относительная влажность сушильного агента при 20°С — 26.1%.

На основании проведённого анализа в качестве окончательного варианта конструкции сушильной камеры был выбран вариант с аксиальной подачей газораспределительной пластиной сушильного агента С с увеличенной плотностью отверстий возле форсунки и с увеличенной длиной вертикальной части входного патрубка. Для данного варианта конструкции был разработан пакет конструкторской документации, по которому был изготовлен экспериментальный образец сушильной камеры. Габаритные размеры сушильной камеры вместе с опорной конструкцией составили 300х300х1965 мм (ДхШхВ), высота рабочей зоны – 800 мм, диаметр рабочей зоны – 150 мм.

В пятой главе описываются экспериментальные исследования, проведённые на установке собственной конструкции, технологическая схема которой представлена на рисунке 8. Установка состоит из: безмасляного компрессора, осуществляющего подачу сушильного агента, магистрального фильтра, адсорбционного осушителя И калорифера, предназначенных для кондиционирования сушильного агента, непосредственно сушильной камеры с установленной в ней ультразвуковой форсункой, частотного генератора для подачи электрического сигнала на форсунку, шприцевого насоса, осуществляющим подачу сырьевой смеси лля диспергирования, перистальтического насоса, подающего теплоноситель в корпус форсунки для её охлаждения, циклона для сбора готового продукта и фильтра тонкой очистки для окончательного обеспыливания отходящих газов.

Были проведены опыты с использованием водных растворов декстрана и поливинилпирролидона (ПВП). Раствор декстрана диспергировался с помощью однопотоковой ультразвуковой форсунки, раствор ПВП — двухпотоковой, с целью получения микроинкапсулированных частиц. Также проводился эксперимент по получению микроразмерных молекулярных сит с узким фракционным составом на основе диоксида кремния. Эксперименты проводились с использованием подобранных в главе 4 технологических параметров. В ходе экспериментов варьировался расход сырьевой смеси в диапазоне от 4 до 10 мл/мин. На рисунке 9 представлены снимки отдельно взятых частиц готовых

продуктов (декстран и ПВП), полученные на сканирующем электронном микроскопе.



Рис. 8. Технологическая схема экспериментальной установки

С Горяева помошью оптического микроскопа, камеры И специализированного программного обеспечения удалось получить кривые распределения полученных частиц по размерам, приведённые на рисунке 10а. Анализу подвергались образцы, полученные при различных расходах сырьевой был получен образец с смеси. Для сравнения также использованием специализированной пневматической форсунки BUECHI, компании предназначенной для получения особо мелких частиц.

На рисунке 10б представлена кривая распределения по размерам для частиц, уловленных в электрофильтре. Массовая доля данных частиц составила 12%. Данные получены с помощью СЭМ и ручной обработки результатов съёмки. Средний диаметр частиц составил порядка 600 нм.



Рис. 9. СЭМ частиц декстрана и ПВП





Как видно из рисунка 10а все образцы, полученные с помощью ультразвуковой форсунки, имеют гораздо более узкое распределение по размерам в сравнении с пневматической форсункой и меньший средний диаметр частиц.

Экспериментальные исследования показали, что разработанная установка в достаточной мере обеспечила выполнение требований, продиктованных особенностями эксплуатации ультразвуковых форсунок, а также экспериментально была подтверждена необходимость ведения процесса с использованием рассчитанных значений технологических параметров.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. На основе комплексного анализа осуществлен выбор диспергирующего устройства, принцип действия которого заключается в отрыве капли под действием высокочастотных колебаний, что обеспечивает получение минимального диаметра частиц (в диапазоне от 0,2 до 25 мкм), а также их узкое распределение по размерам. 2. Выявлены особенности работы ультразвуковых форсунок: процесс распыла осуществляется в направлении снизу вверх, начальная скорость диспергированных частиц и их масса очень малы, существует возможность диспергирования не только истинных растворов, но и суспензий с твердыми включениями, и возможность получения микроинкапсулированных частиц. Проведены экспериментальные исследования по определению начальной скорости диспергированных частиц, которая составила 0.2 м/с.

3. Разработано математическое описание, отражающая гидродинамику процесса диспергирования и кинетику сушки. Численное решение системы уравнений осуществлено с использованием программного пакета Fluent.

4. Проведён комплекс расчётов по уравнениям математической модели различных вариантов конструкции сушильной камеры, ДЛЯ внутренних газораспределительных элементов, параметров ВХОДНЫХ патрубков, через которые осуществляется подача сушильного агента (всего 23 варианта). Выбран конструкции, обеспечивающий гидродинамическую обстановку, вариант препятствующую оседанию влажных частиц диспергированного материала на стенках камеры, газораспределительных элементах И поверхностях ультразвуковой форсунки. Проведены расчёты по подбору технологических параметров процесса и разработана соответствующая методика.

5. Разработан комплект конструкторской документации для выбранной конструкции сушильной камеры.

6. В соответствии с конструкторской документацией изготовлена сушильная камера и создана экспериментальная установка для получения нано- и микрочастиц диспергированием.

7. Проведены экспериментальные исследования с применением одно- и двухпотоковой форсунок, в результате которых получены порошки, состоящие из частиц с размерами менее 1 мкм, с размерами от 1 до 20 мкм и узким распределением по размерам, проведены эксперименты по получению микроразмерных молекулярных сит с узким фракционным составом на основе диоксида кремния.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *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.

2. *Меньшутина Н.В., Гордиенко М.Г., Лебедев Е.А.* Инновационное оборудование для получения нано- и микропорошков // Естественные и технические науки – 2012 – №6 – С. 36-38.

3. *Войновский А.А., Лебедев Е.А.* Исследование и моделирование процесса диспергирования (ММТТ-22): сборник трудов. – 2009. – Т.9. – С. 14-17.

4. A.Voynovskiy, E. Lebedev, M. Gordienko, N. Menshutina and O. Alves-Filho. Particle Dispersion Modeling in Spray Drying // CD-ROM proceedings of 4th Nordic Drying Conference (NDC2009), Reykjavik, Iceland, 2009 – 10p.

5. Войновский А.А., Лебедев Е.А. Использование технологии СFD для моделирования процесса распылительной сушки // Сб. научных трудов «Успехи в химии и химической технологии» / РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва 2009, Т.ХХІІІ, №1, с. 44-49.

6. *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 – ESCAPE20 – Ischia, Italy, 2010. – P. 1859-1864.

7. Войновский А.А., Лебедев Е.А., Меньшутина Н.В. Разработка оборудования для процесса получения микрочастиц диспергированием // ММТТ-23 - Сб. научных трудов XXIII Междунар. науч. конф. – 2010. – Т.З. – С. 105-108.

8. А.А. Войновский, Е.А. Лебедев. Применение CFD-моделирования для проектирования нового оборудования // Инновационные материалы и технологии в химической и фармацевтической отраслях промышленности: Сборник докладов международной конференции с элементами научной школы для молодёжи.-2010.- С. 129-130.

9. Заявка на патент на изобретение №2012148192. Меньшутина Н.В., Лебедев Е.А., Гордиенко М.Г. – дата приоритета 14.11.2012.