



## Последние достижения в области распылительной сушки



Анастасия В. Мосюрова<sup>1</sup> [mosiurova.a.v@muctr.ru](mailto:mosiurova.a.v@muctr.ru)  0009-0008-2032-6821  
Наталья В. Меньшутина<sup>1</sup> [chemcom@muctr.ru](mailto:chemcom@muctr.ru)  0000-0001-7806-1426

<sup>1</sup> Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, г. Москва, 125480, Россия

**Аннотация.** В обзоре представлен анализ современных тенденций и технологических инноваций в области распылительной сушки — высокоэффективного метода получения порошкообразных материалов из жидкотекучих сред. Несмотря на более чем полуторазековую историю, этот процесс продолжает активно развиваться, что обусловлено потребностью в снижении энергозатрат, повышении управляемости характеристик частиц и минимизации экологической нагрузки. Статья детально рассматривает устройство классических распылительных сушилок, включая стадии диспергирования, сушки и сепарации. Проведен сравнительный анализ различных типов распылительных устройств (центробежных, гидравлических, пневматических, ультразвуковых и электростатических), а также конфигураций сушильных камер, определяющих термическую историю продукта и его конечные свойства. Центральное место в работе занимает описание перспективных технологических модификаций, расширяющих границы применения традиционной сушки. Среди них выделяются нанораспылительная сушка для получения субмикронных частиц с узким распределением по размерам, распылительная сублимационная сушка, обеспечивающая сохранность высокопористой структуры термолабильных материалов, а также методы с применением импульсного горения, вакуума и перегретого пара, позволяющие значительно снизить термическую нагрузку и повысить энергетическую эффективность процесса. Отдельно рассматриваются подходы к совмещению сушки с инкапсулированием, агломерацией и получением аморфных дисперсий. Проведенный анализ показывает, что современное развитие технологии носит целенаправленный характер и тесно связано с запросами высокотехнологичных отраслей, таких как фармацевтика, биотехнологии и производство функциональных материалов. Приоритетными направлениями дальнейших исследований являются разработка адаптивных систем управления с элементами искусственного интеллекта, создание замкнутых энерго- и ресурсосберегающих циклов, а также углублённое моделирование процессов формирования частиц для прецизионного конструирования порошков с заданными функциональными свойствами.

**Ключевые слова:** распылительная сушка, распылительное устройство, сухие микрочастицы.

## Recent advances in spray drying

Anastasiia V. Mosyurova<sup>1</sup> [mosiurova.a.v@muctr.ru](mailto:mosiurova.a.v@muctr.ru)  0009-0008-2032-6821  
Natalia V. Menshutina<sup>1</sup> [chemcom@muctr.ru](mailto:chemcom@muctr.ru)  0000-0001-7806-1426

<sup>1</sup> Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, st. Geroev Panfilovtsev, 20, 125480, Russia

**Abstract.** This review analyzes current trends and technological innovations in spray drying—a highly efficient method for producing powdered materials from flowing media. Despite its more than 150-year history, this process continues to rapidly evolve, driven by the need to reduce energy costs, improve control over particle characteristics, and minimize environmental impact. The article examines in detail the design of traditional spray dryers, including the dispersion, drying, and separation stages. A comparative analysis of various types of spray devices (centrifugal, hydraulic, pneumatic, ultrasonic, and electrostatic) is provided, as well as drying chamber configurations that determine the thermal history of the product and its final properties. A central focus of the paper is a description of promising technological modifications that expand the scope of traditional drying. Among these are nanospray drying for producing submicron particles with a narrow size distribution; spray freeze-drying, which preserves the highly porous structure of heat-sensitive materials; and methods using pulsed combustion, vacuum, and superheated steam, which significantly reduce thermal load and improve process energy efficiency. Approaches to combining drying with encapsulation, agglomeration, and the production of amorphous dispersions are considered separately. The analysis demonstrates that current technological development is targeted and closely aligned with the needs of high-tech industries such as pharmaceuticals, biotechnology, and the production of functional materials. Priority areas for further research include the development of adaptive control systems with elements of artificial intelligence, the creation of closed energy- and resource-saving cycles, and in-depth modeling of particle formation processes for the precision design of powders with desired functional properties.

**Keywords:** spray drying, atomization, dry microparticles.

### Введение

Распылительная сушка — это непрерывный одноступенчатый технологический процесс с широким диапазоном параметров работы, с различными конструкциями аппаратов и режимами работы. Процесс распылительной сушки можно описать тремя основными стадиями:

Для цитирования

Мосюрова А.В., Меньшутина Н.В. Последние достижения в области распылительной сушки // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 207–216. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-207-216

диспергирование жидкотекучего материала распылительным устройством, формирование частиц в результате интенсивного тепло-массообмена капель материала и сушильного агента в камере аппарата, сбор сухих частиц готового продукта [1, 2]. На рисунке 1 представлен пример схемы распылительной сушилки.

For citation

Mosyurova A.V., Menshutina N.V. Recent advances in spray drying. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 207–216. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-207-216

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

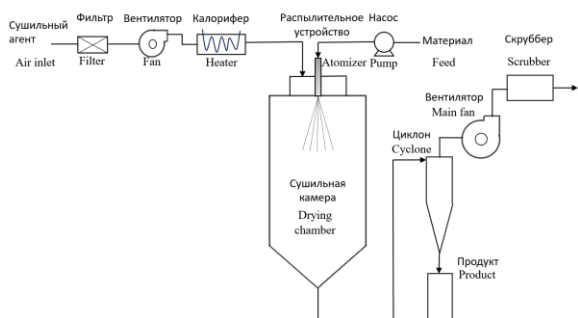


Рисунок 1. Схема распылительной сушилки, работающей по принципу параллельного тока сушильного агента и жидкотекучего материала

Figure 1. Spray – drying process and plant. Co-current flow

Процесс распылительной сушки проходит следующим образом: жидкотекучий материал перекачивается из резервуара в распылительное устройство, обычно расположенное в распределителе сушильного агента в верхней части сушильной камеры; сушильный агент подается приточным вентилятором из атмосферы через фильтр и проходит через нагреватель в распределитель; в сушильной камере аппарата распылительное устройство диспергирует жидкотекучий материал в мельчайшие капли, которые встречаются с горячим сушильным агентом; в результате интенсивного тепло-массообмена капель материала и сушильного агента происходит высыхание и формирование частиц, охлаждение сушильного агента; высушенный продукт увлекается потоком сушильного агента в циклон, в котором происходит отделение высушенных частиц продукта от сушильного агента в сборник; отработанный сушильный агент выводится вытяжным вентилятором в скруббер, в котором оседает мельчайшая фракция неотделенных частиц продукта.

В литературе представлено большое количество подробных описаний процесса распылительной сушки. Основы теории и расчета распылительной сушки изложены в книге М.В. Лыкова и Б.И. Леончика [1]. Расчет наиболее подходящей формы сушильной камеры производится с помощью соответствующих уравнений, хотя для выполнения таких расчетов требуются определенные упрощения, касающиеся сложной гидродинамики и взаимных взаимодействий в трехфазной системе, состоящих из газа, капель и твердых частиц.

### Стадии распылительной сушки и конструкция распылительной сушилки

Диспергирование является наиболее значимой стадией процесса распылительной сушки, оказывающей значительное влияние

на конечный размер частиц продукта, который зависит от размера и гранулометрического распределения капель, их траектории и скорости.

Ученые [3] представили обширный обзор моделей для расчета размера капель и заключили, что размер капли зависит от физико-химических (вязкости, плотности, поверхностного натяжения, концентрации) и реологических свойств жидкости и характеристик работы распыляющего устройства, однако данные корреляции эмпирические и имеют погрешности, что ограничивает их использование для проектирования процесса распылительной сушки.

Диспергирование может осуществляться под действием центробежной силы, гидравлического давления, ультразвуковой или электростатической энергии с помощью распылительных устройств. В зависимости от целей распылительной сушки и характера исходного материала, используются различные типы распылительных устройств:

- Центробежные (дисковые) распылители;
- Гидравлические (струйные или центробежные) форсунки;
- Пневматические (двухжидкостные или трехжидкостные) форсунки;
- Ультразвуковые форсунки.

В таблице 1 обобщена основная информация о распылительных устройствах [1, 2, 4–8].

На рисунке 2 изображены примеры распылительных устройств, используемых для распылительной сушки.

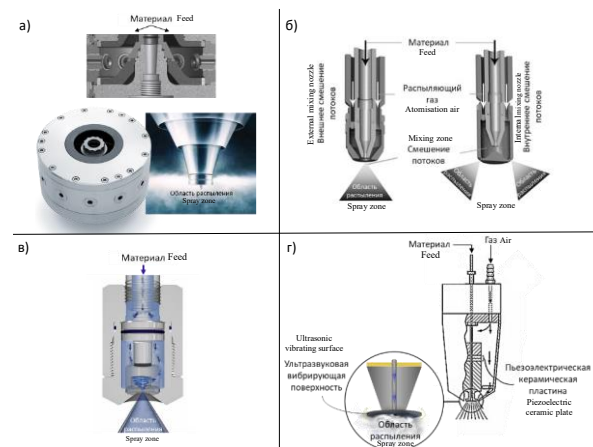


Рисунок 2. Распылительные устройства: а) новая оригинальная конструкция дискового распылителя [9, 10]; б) пневматическая форсунка [11]; в) гидравлическая центробежная форсунка [12]; г) ультразвуковая форсунка [13]

Figure 2. Schematic representation of conventional atomizers used on spray drying: a) new original design of the disc atomizer [9, 10]; b) pneumatic nozzle atomizer – internal and external two-fluid nozzles [11]; c) hydraulic centrifugal nozzle [12]; d) ultrasonic atomizer [13]

Таблица 1.

Table 1.

Типы распылительных устройств

Various types of atomizers used in spray dryers

| Распылительное устройство<br>Atomizer                          | Дисковый распылитель<br>Roary wheel/disk  | Гидравлическая форсунка<br>Hydraulic nozzle  | Пневматическая форсунка<br>Pneumatic nozzle   | Ультразвуковая форсунка<br>Ultrasonic nozzle   |
|--|---|--|---|--|
| Принцип работы<br>Principle of operation                       | Истечение струек или пленок материала с быстровращающегося диска в относительно низкоскоростной поток сушильного агента<br>The outflow of streams or films of feed from a fast-rotating disk into a relatively low-speed stream of drying agent | Подача материала под давлением через трубку с уменьшающимся диаметром<br>Feeding of feed under pressure through a tube with a decreasing diameter  | Диспергирование материала потоком сжатого газа<br>Feed dispersion by compressed gas flow  | Диспергирование материала под действием вибраций ультразвуковой частоты (60–140 кГц)<br>Dispersion of feed under the influence of ultrasonic frequency vibrations (60–140 kHz) |
| Типы конструкции<br>Various design                             | Конструкции дисков: гладкие, лопастные, сопловые<br>Disc designs: smooth, vane, nozzle  | Струйные и центробежные<br>Blasting and centrifugal  | Двухпоточные или трехпоточные, со внутренним или внешним смешением потоков<br>Two-fluid or Three-fluid, with internal or external flow mixing |  |
| Характер диспергируемого материала<br>Feed characteristics     | Жидкость с высокой вязкостью, абразивные материалы<br>High-viscosity feed, abrasive materials   | Однородные жидкости невысокой вязкости, гомогенизированные системы с отсутствием твердых и абразивных включений<br>Homogeneous feed with low viscosity, homogenized systems with absence of hard and abrasive inclusions | Жидкость с высокой вязкостью (свыше 0,1 П • с), суспензии<br>Feeds of high viscosity (over 0,1 Pa • s), suspensions                           | Жидкость с невысокой вязкостью<br>Low-viscosity feed   |
| Тип распыления<br>Spray type                                   | Высокая однородность распыления, широкий диапазон среднего размера капель<br>High homogeneity of spraying, wide range of medium droplet size  | Капли в узком диапазоне диаметров<br>Drops in a narrow diameter range  | Низкий средний размер капель с высокой степенью однородности<br>Low average droplet size with high degree of uniformity                       | Узкое распределение капель и частиц по размеру<br>Narrow size distribution of droplets and particles   |
| Размер частиц, мкм<br>Particle size, $\mu\text{m}$             | 10–2000   | 20–600   | 3–200   | 0,01–100   |
| Параметры, влияющие на размер капель<br>Atomization parameters | Скорость вращения диска<br>Disc speed   | Гидравлическое давление<br>Hydraulic pressure  | Диаметр сопла; Соотношение массового потока распыляющего газа/материала<br>Nozzle diameter; The ratio of the mass flow of air to feed         | Частота ультразвука; Расход материала<br>Ultrasound frequency; Feed flow rate  |

В большинстве процессов распылительной сушки используются описанные выше, наиболее распространенные распылительные устройства, однако существуют различные конфигурации распылительных устройств на стадии разработки.

Технология распылительной сушки с помощью электрического поля стала перспективным методом получения микро – наночастиц материалов различного состава, морфологии, формы, текстуры и размера [14–18]. Электростатическое распыление представляет собой процесс диспергирования жидкотекучего материала, при котором электростатический заряд (1–30 кВ) подается на сопло распылительного устройства [19, 20]. В патенте [21] представлен способ получения порошка активного соединения методом электростатической распылительной сушки, а также представлен подробный вид электростатической распылительной форсунки (рисунок 3).

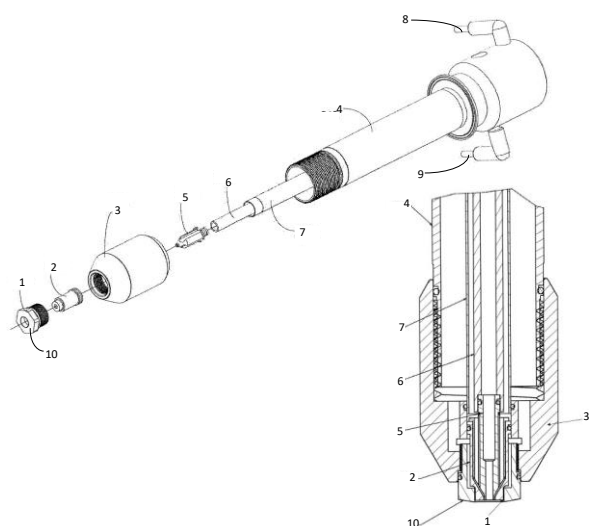


Рисунок 3. Электростатическая распылительная форсунка [21]: 1 – отверстие индукционного кольца; 2 – колпачок трубки распыляющего газа; 3 – корпус сопла; 4 – трубка продувающего газа; 5 – насадка трубки жидкотекучего материала; 6 – трубка жидкотекучего материала; 7 – трубка распыляющего газа; 8 – заземляющий электрод; 9 – индукционный электрод; 10 – индукционное кольцо

Figure 3. Electrostatic spray nozzle [21]: 1 – opening of the induction ring; 2 – atomizing gas cap; 3 – the nozzle head; 4 – the purge gas tube; 5 – a fluid tip; 6 – a fluid tube; 7 – the atomizing gas tube; 8 – electrical ground electrode; 9 – the induction field electrode; 10 – the induction ring

Данная форсунка имеет электростатическое распылительное сопло, включающее индукционное кольцо 10, выполненное в виде электропроводящего металлического удерживающего колпачка, расположенного в выходном отверстии распылительного сопла. Электростатический заряд распыляемых капель достигается

за счет создания электродом индукционного поля и передачи электростатического заряда по электропроводящей поверхности трубки распыляющего газа. Под действием кулоновских сил наиболее полярный компонент (в большинстве случаев растворитель) оказывается на поверхности капли, а компонент, имеющий наименьший электрический дипольный момент, концентрируется в центре капли. Преимуществом данного метода является возможность снижения рабочих температур сушки, что позволяет применять его для термочувствительных веществ, а также обеспечивать физическую стабильность продукта.

Следующая за диспергированием жидкотекучего материала стадия преобразования капель в частицы включает в себя контакт капель жидкотекучего материала с сушильным агентом и испарение влаги из капель жидкотекучего материала. Существуют три основных типа распылительных сушилок, классифицированных по принципу движения сушильного агента и осушаемого жидкотекучего материала (рисунок 4): параллельный ток, противоточный, смешанный ток [1, 2, 16].

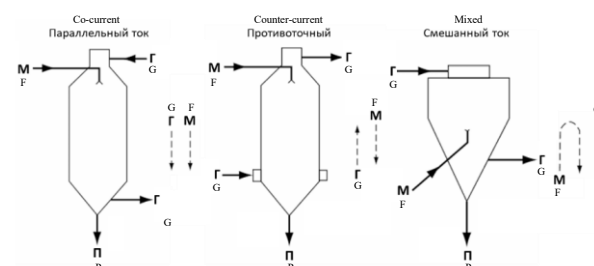


Рисунок 4. Схемы работы сушильных камер: Г – газ; М – материал; П – продукт

Figure 4. Drying chamber layouts: G – gas; F – feed; P – products

Направление сушильного агента и равномерность скорости сушильного агента по поперечному сечению сушильной камеры очень важны для определения качества конечного продукта и оказывает глубокое влияние на свойства конечных частиц. При параллельном токе сушильный агент и диспергированный жидкотекучий материал движутся в одном направлении сушильной камеры. Данный тип аппарата подходит для термочувствительных материалов, поскольку капли не подвергаются воздействию высоких температур на входе в сушильную камеру из-за эффекта испарительного охлаждения [22]. Аппараты с параллельным током являются наиболее универсальными и наиболее часто используемыми, в частности

в пищевой (сушка яичного белка, молока, сока и др.), химической (производство пестицидов, красителей, керамических материалов) и фармацевтической (биопрепараты, фармацевтические порошки для ингаляционного введения) промышленности. Противоточный тип движения представляет собой встречное направление потоков сушильного агента и диспергированного жидкотекучего материала, при котором капля сталкивается с нагретым сушильным агентом в конце процесса сушки, и, как правило, подвергается более высокому тепловому воздействию [4]. Принцип противотока обычно применяется в производстве термостойких материалов, таких как моющие средства [23]. Основными преимуществами противотока являются сокращение энергетических затрат и возможность внедрения нескольких операций в одном аппарате, например сушки, агломерации, разделения на фракции. При осуществлении рециркуляции потока частиц в сушильной камере возникает так называемый принцип смешанного тока. Применение принципа смешанного тока в исследовании [24] привело к увеличению производительности микрокапсулированных порошков пробиотиков с сохранением активности ферментов в процессе сушки.

Сухие частицы, образующиеся в процессе распылительной сушки, необходимо отделить от газовой фазы, содержащей охлажденный сушильный агент и выпаренный растворитель. Сепарация может осуществляться как внутри сушильной камеры, так и снаружи

в разделительном устройстве. Крупные частицы оседают на дне сушильной камеры затем попадают в приемный бункер или удаляются со дна сушильной камеры при помощи специальных приспособлений (скребки, устройства, модифицирующие дно сушильной камеры, вибрационные устройства). Ко внешним разделительным устройствам относятся: циклоны, рукавные фильтры, электрофильтры, мокрые скрубберы и орошаемые вентиляторы [1, 5, 22, 25].

### Новые разработки в технологии распылительной сушки

Процесс распылительной сушки помимо задачи получения частиц применяется для получения аморфных твердых дисперсий, микронизации, агломерации и гранулирования, инкапсуляции жидких и твердых веществ. Преимущество распылительной сушки заключается в том, что эта технология позволяет работать с термочувствительными и термостойкими жидкотекучими материалами, получая сухой порошок продукта с контролируемым размером частиц, формой, влажностью и другими специфическими свойствами; обеспечивает непрерывную работу, адаптируемую как к ручному, так и автоматизированному управлению; работает в широком диапазоне производительностей и обеспечивает широкую вариативность конструкций аппаратов, удовлетворяя индивидуальные требования к сырью и продукту [1,2].

Примеры продукции, высушенной распылением в промышленных масштабах, приведены в таблице 2 [1, 2, 4, 5, 26].

Таблица 2.

Примеры применения распылительной сушки

Table 2.

Application examples of spray drying

|  |   |
|--|---|
| Химическая промышленность<br>Chemical industry             | Фенолформальдегидные смолы, катализаторы, поливинилхлориды, аминокислоты, оксиды алюминия, карбиды, оксиды железа, каолин, красители и пигменты (хромовый желтый, диоксид титана), удобрения (нитраты, соли аммония, фосфаты), ферменты моющих средств, отбеливатели, эмульгаторы<br>Phenol-formaldehyde resins, catalysts, polyvinyl chlorides, amino acids, aluminum oxides, carbides, iron oxides, kaolin, dyestuffs and pigments (chrome yellow, titanium dioxide), fertilizers (nitrates, ammonium salts, phosphates), detergent enzymes, bleach powder, emulsifying agent |
| Пищевая промышленность<br>Food industry                    | Молоко, сыворотка, яйца, соевый белок, фрукты и овощи (банан, томаты, кокосовое молоко), глюкоза, мальтодекстрин, кофе, чай<br>Milk, whey, egg, soya protein, fruits and vegetables (banana, tomato, coconut milk), glucose, maltodextrin, coffee, tea  |
| Фармацевтическая промышленность<br>Pharmaceutical industry | Пенициллин, ферменты, гормоны, аминокислоты, белки, плазма крови, антибиотики, вакцины   Penicillin, enzymes, hormones, amino acids, proteins, blood plasma, antibiotics, vaccines  |

Хотя распылительная сушка является методом сушки со значительным преимуществом для многих жидкотекучих материалов, она все же имеет некоторые ограничения и недостатки. Некоторые из них уже были преодолены, но некоторые все еще требуют внимания и

дальнейших исследований, такие как проблемы с неподходящим размером частиц и их распределением по размеру, потеря качества продукта из-за нагрева, сложность оптимизации условий для различных типов жидкотекучих материалов, снижение потребления энергии [22].



В технологии сушки трудно провести четкое различие между тем, что является традиционной технологией, и тем, что действительно является новой, поскольку большинство новых разработок являются эволюционными, т. е. основанными на традиционных технологиях [27]. В следующих абзацах описаны модификации в технологии распылительной сушки.

В работе [28] представлен обзор модификаций распылительной сушки, направленных на повышение производительности и улучшение свойств порошка: распылительная сушка с импульсным горением и экструзионная порификация.

Экструзионная порификация – технология, состоящая из трех стадий: вакуумное выпаривание сырья до достижения им вязкости  $2\text{--}5 \text{ Па} \cdot \text{с}$  (с возможностью работы до  $20 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ); двухшнековая экструзия-аэрация вязкого продукта, проводимая в присутствии газа (обычно  $\text{CO}_2$  или  $\text{N}_2$ ); сушка, при которой текстурированная пена с высоким содержанием твердых частиц, полученная на предыдущем этапе, впрыскивается в распылительную башню. Данная технология позволяет значительно снизить температуру продукта на выходе за счет более быстрого переноса влаги во время сушки в образующейся пористой структуре частиц продукта [28].

Распылительная сушка с импульсным горением состоит из технологии распылительной сушки в сочетании с импульсной установкой сгорания для генерации потока газа, исключаяющей распылительное устройство. Метод основан на прерывистом сгорании – периодическом зажигании и сгорании смеси топлива и воздуха, которые распространяют горячий газ и генерируют акустические волны в сушильной камере, непосредственно использующиеся для диспергирования и сушки газа [29]. Такие условия приводят к образованию корки на поверхности капель и формированию полых либо сжатых частиц [30]. Преимуществами распылительной сушки с импульсным горением являются высокая энергетическая эффективность и возможность работы с сырьем высокой вязкости или высоким содержанием твердых веществ. Недостатком, ограничивающим широкое использование распылительной сушки с импульсным горением, является высокий уровень шума, создаваемого этими типами сушилок.

Распылительная сушка для получения наночастиц – технология распылительной сушки, которая позволяет получать наноразмерные частицы в диапазоне размеров  $300 \text{ нм} \text{--} 5 \text{ мкм}$ . Принцип данной модификации аналогичен принципу обычной распылительной сушки. Отличие конструкции аппарата распылительной сушилки для получения наночастиц заключается в цилиндрической сушильной камере,

модификации распылительного устройства и системы нагрева и подачи сушильного агента, сборе частиц электростатическим коллектором. Оборудование для распылительной сушилки для получения наночастиц было впервые представлено компанией Büchi technology (Nano Spray Dryer B-90) на рисунке 5.

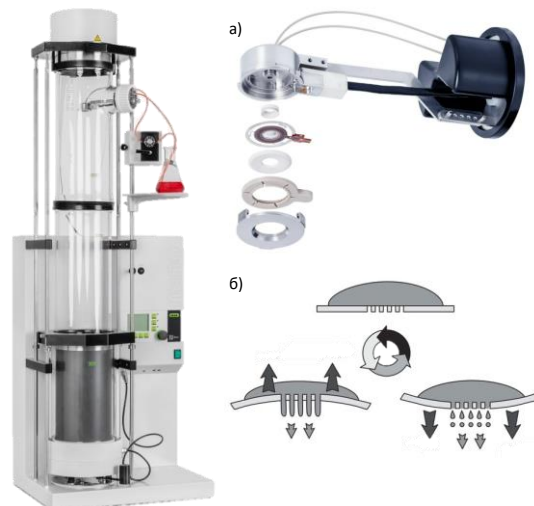


Рисунок 5. Распылительная сушилка Nano Spray Dryer B-90 а) оригинальная ультразвуковая форсунка; б) схематическое изображение распылительной сетки для генерации капель [31]

Figure 5. Nano Spray Dryer B-90 a) original ultrasonic nozzle; b) schematic representation of the spray mesh for the generation of droplets

Распылительное устройство (рисунок 5а) представляет собой распыляющую головку с пьезоэлектрическим приводом, включающем тонкую вибрационную перфорированную мембрану (сетку). Сетка изготовлена из тонкой нержавеющей стали, перфорированной микрометровыми отверстиями, сделанных лазерным сверлением. Отверстия имеют конусообразную форму, с большим диаметром, обращенным к стороне подачи жидкотекучего материала, и более узким диаметром, обращенным к стороне выброса капель. Колебания ультразвуковой частоты деформируют распылительную сетку на несколько микрон (рисунок 5б), заставляя каждое отверстие действовать как микронасос и формируя капли одинакового размера из каждого отверстия.

Модификация системы нагрева и подачи сушильного агента в распылительных сушилках для получения наночастиц направлена на создание ламинарного потока сушильного агента, позволяющего ограничивать траекторию движения частиц в пределах профиля и снижать контакт частиц со стенками сушильной камеры. В Nano Spray Dryer B-90 ламинарный поток сушильного агента создается с помощью пористого металлического диска, который также содержит электрическую нагревательную спираль,

обеспечивающую эффективную теплопередачу от горячей металлической поверхности к сушильному агенту [32].

Распылительная сублимационная сушка представляет собой перспективную технологию, предназначенную для производства широкого спектра фармацевтических препаратов, пищевых продуктов и активных компонентов с высоким качеством и повышенной стабильностью благодаря их уникальным структурным характеристикам, такими как высокая пористость, пониженная плотность и сферическая форма, а также таких материалов как керамика, катализаторы и изоляционные материалы. Распылительная сублимационная сушка – это периодический или непрерывный процесс, являющийся комбинацией процессов распылительной и сублимационной (атмосферной или вакуумной) сушки. В работе [33] подробно описан процесс распылительной сублимационной сушки, который включает в себя следующие этапы: распыление, замораживание, сублимационная сушка. В работах [34,35] представлены исследования процесса распылительной атмосферной сублимационной сушки и конструкции аппаратов лабораторного масштаба. Недостатком распылительной сублимационной сушки являются сложные эксплуатационные требования, ограничивающие масштабируемость, и высокие капитальные затраты. Первая установка распылительной сублимационной сушки промышленного масштаба компании [36] представляет собой объединенные в одну изолированную технологическую линию камеру заморозки капель диспергированного жидкотекучего материала (SprayCon) и цилиндрический вращающийся барабан динамической сублимационной сушки замороженных микросфер (LyoMotion). После завершения сушки полученный однородный сыпучий продукт загружают в контейнер, который может быть соединен со стерильным изолятором для наполнения порошком [37].

Вакуумная распылительная сушка является перспективной модификацией, позволяющей снижать температуру сушки и уменьшать риск потенциального окисления чувствительных соединений. Давление в сушильной камере поддерживается низким. Растворитель испаряется из распыленных капель из-за разницы давлений

водяного пара в каплях и в сушильной камере. Недостатком метода является высокая стоимость техники, поэтому он не широко применяется в промышленности [38].

Распылительная сушка перегретым паром – модификация, в которой в качестве сушильного агента используется перегретый пар. В работе [39] утверждается, что распылительная сушка перегретым паром может снизить энергозатраты процесса на 20–30 %, а в случаях повторного использования пара – до 80 %. Существенным преимуществом этого решения является отсутствие контакта высушиваемого вещества с воздухом и, следовательно, отсутствие риска окисления. Однако его недостаток заключается в требовании к эксплуатации при высоких температурах.

### Заключение

Обзор литературы о последних достижениях в области распылительной сушки показывает, что с момента раннего развития система распылительной сушки эволюционировала. Эта эволюция является многонаправленной и направлена на преодоление конкретных недостатков традиционной технологии распылительной сушки. На сегодняшний день нет универсального подхода, и он должен быть выбран в зависимости от требований к процессу и конечному продукту.

В данной статье представлены принцип работы и устройство аппарата распылительной сушки, а также новые разработки в технологии распылительной сушки. В работе описаны стадии процесса распылительной сушки, рассмотрены различные типы распылительных устройств, их характеристики и особенности, представлены конфигурации сушильных камер распылительных сушилок и их сферы применения. Описаны такие модификации распылительных сушилок как: распылительная сушка с импульсным горением, экструзионная порификация, нанораспылительная сушка, распылительная сублимационная сушка, вакуумная распылительная сушка и распылительная сушка перегретым паром. Данные модификации улучшают процесс распылительной сушки и точность качественных характеристик частиц продукта.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект FSSM-2025–0003).

### Литература

- 1 Лыков М.В., Леончик Б.И. Распылительные сушилки. Основы теории и расчета. Москва: Машиностроение, 1966. 331 с.
- 2 Filková I., Huang L.X., Mujumdar A.S. Industrial spray drying systems // Handbook of industrial drying. 2006. V. 3. P. 215–256.
- 3 Camacho-Lie M., Allendes A., Mancilla C., Illanes A., Vera C. Factors influencing droplet size in pneumatic and ultrasonic atomization and its application in food processing // Discover Food. 2023. V. 3. № 1. P. 23. doi: 10.1007/s44187-023-00065-5.
- 4 Ziaee A., Seyed A., Mortazavi A., Tabatabaeeekolour R. Spray drying of food: principles and applications // Drying Technology in Food Processing. Woodhead Publishing, 2023. P. 23–155. doi: 10.1016/B978-0-12-819895-7.00010-9.
- 5 Bhandari B.R., Patel K.C., Chen X.D. Spray drying of food materials-process and product characteristics // Drying technologies in food processing. 2008. V. 4. P. 113–157.
- 6 Тимонин А.С., Божко Г.В., Борщев В.Я. и др. Оборудование нефтегазопереработки, химических и нефтехимических производств: учебник для вузов. В 2 кн. Кн. 2. Москва: Инфра-Инженерия, 2019. 476 с.

- 7 Акулич П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок. Минск: Беларус. навука, 2010. 443 с.
- 8 Khaire R.A., Gogate P.R. Novel approaches based on ultrasound for spray drying of food and bioactive compounds // *Drying Technology*. 2021. V. 39. № 12. P. 1832–1853. doi: 10.1080/07373937.2020.1804926.
- 9 RPM Solutions, Inc. URL: <https://www.rpmsolutions.com/products-services/atomizer-parts-new/240mm-titanium-wheel/> (дата обращения: 12.08.2025).
- 10 GEA. URL: <https://www.gea.com/en/assets/170518/> (дата обращения: 12.09.2025).
- 11 Salman A.D., Hounslow M., Seville J.P.K. (ed.). *Granulation*. Elsevier, 2006. 1592 с.
- 12 Spraying Systems Co. Бюллетень продукции. URL: [https://www.spray.com/-/media/dam/industrial/usa/sales-material/product-market-bulletin/b695c\\_spraydry\\_bulletin.pdf](https://www.spray.com/-/media/dam/industrial/usa/sales-material/product-market-bulletin/b695c_spraydry_bulletin.pdf) (дата обращения: 12.09.2025).
- 13 Hoerbiger. URL: <https://www.piezoproducts.com/products-solutions/ultrasonic-atomizers/> (дата обращения: 12.09.2025).
- 14 Lastow O., Andersson J., Nilsson A., Balachandran W. Low-Voltage Electrohydrodynamic (EHD) Spray Drying of Respirable Particles // *Pharmaceutical Development and Technology*. 2007. V. 12. № 2. P. 175–181. doi: 10.1080/10837450701212594.
- 15 Chutani D., Huppertz T., Murphy E. Application of Electric Field Technologies in the Manufacture of Food Powders and the Retention of Bioactive Compounds // *Powders*. 2023. V. 2. № 1. P. 135–150. doi: 10.3390/powders2010010.
- 16 Cal K., Sollohub K. Spray drying technique. I: Hardware and process parameters // *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2010. V. 99. № 2. P. 575–586. doi: 10.1002/jps.21886.
- 17 Boda S.K., Li X., Xie J. Electro spraying an enabling technology for pharmaceutical and biomedical applications: A review // *Journal of Aerosol Science*. 2018. V. 125. P. 164–181. doi: 10.1016/j.jaerosci.2018.04.002.
- 18 Bhushani J.A., Anandharamakrishnan C. Electrospinning and electro spraying techniques: Potential food based applications // *Trends in Food Science and Technology*. 2014. V. 38. № 1. P. 21–33. doi: 10.1016/j.tifs.2014.03.004.
- 19 Masum A.K.M., Saxena J., Zisu B. Electrostatic spray drying of high oil load emulsions, milk and heat sensitive biomaterials // *Food Engineering Innovations Across the Food Supply Chain*. 2022. P. 237–246. doi: 10.1016/B978-0-12-821292-9.00022-4.
- 20 Jayaprakash P., Pandit P., Durgalakshmi D., Vijayakumar P.S., Balakrishnan A., Rameshbabu P., Shanmugam R., Gopi S. Encapsulation of bioactive compounds using competitive emerging techniques: Electro spraying, nano spray drying, and electrostatic spray drying // *Journal of Food Engineering*. 2023. V. 339. P. 111260. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111260.
- 21 Пат. US20230240314A1 (CIIA). Electrostatic spray dried active compound powders and production method thereof / Zisu B., Masum A.K.M., Pham B.L., Thenin M., Maudhuit A., Beaupeux E., Ackerman T.E., Rusch J.T., Wee Sit L.J.; заявл. 21.10.2021; опубл. 27.07.2023.
- 22 Bellinghausen R. Spray drying from yesterday to tomorrow: An industrial perspective // *Drying Technology*. 2019. V. 37. № 5. P. 612–622. doi: 10.1080/07373937.2018.1517778.
- 23 Wawrzyniak P., Jaskulski M., Piatkowski M., Sobulska M., Zbicinski I., Egan S. Experimental detergent drying analysis in a counter-current spray dryer with swirling air flow // *Drying Technology*. 2019. V. 38. № 2. P. 108–116. doi: 10.1080/07373937.2019.1626878.
- 24 Jiang N., Kumar G.D., Chen J., Mishra A., Solval K.M. Comparison of concurrent and mixed-flow spray drying on viability, growth kinetics and biofilm formation of *Lactobacillus rhamnosus* GG microencapsulated with fish gelatin and maltodextrin // *LWT*. 2020. V. 124. P. 109200. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109200.
- 25 Santos D., Mauricio A.C., Sencadas V., Santos J.D., Fernandes M.H., Gomes P.S. *Spray Drying: An Overview // Biomaterials – Physics and Chemistry*. New Edition. 2018. P. 237–258. doi: 10.5772/intechopen.72247.
- 26 Samborska K., Poozesh S., Barańska A., Sobulska M., Jedlińska A., Arpagaus C., Malekjani N., Jafari S.M. Innovations in spray drying process for food and pharma industries // *Journal of Food Engineering*. 2022. V. 321. P. 110960. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.110960.
- 27 Mujumdar A.S. An overview of innovation in industrial drying: current status and R&D needs // *Transport in Porous Media*. 2007. V. 66. P. 3–18. doi: 10.1007/s11242-006-9018-y.
- 28 Dantas A., Piella-Rifà M., Pontes Costa D., Felipe X., Gou P. Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application // *Applied Food Research*. 2024. V. 4. № 1. P. 100382. doi: 10.1016/j.afres.2023.100382.
- 29 Wu Z., Yue L., Li Z., Li J., Mujumdar A.S., Rehkopf J.A. Pulse combustion spray drying of egg white: energy efficiency and product quality // *Food and Bioprocess Technology*. 2014. V. 8. № 1. P. 148–157. doi: 10.1007/s11947-014-1384-9.
- 30 Boel E., Koekoekx R., Dedroog S., Babkin I., Vetrano M.R., Clasen C., Van den Mooter G. Unraveling Particle Formation: From Single Droplet Drying to Spray Drying and Electro spraying // *Pharmaceutics*. 2020. V. 12. № 7. P. 625. doi: 10.3390/pharmaceutics12070625.
- 31 Piñón-Balderrama C.I., Leyva-Porras C., Terán-Figueroa Y., Espinosa-Solis V., Álvarez-Salas C., Saavedra-Leos M.Z. Encapsulation of Active Ingredients in Food Industry by Spray-Drying and Nano Spray-Drying Technologies // *Processes*. 2020. V. 8. № 8. P. 889. doi: 10.3390/pr8080889.
- 32 Samborska K., Poozesh S., Barańska A., Sobulska M., Jedlińska A., Arpagaus C., Malekjani N., Jafari S.M. Innovations in spray drying process for food and pharma industries // *Journal of Food Engineering*. 2022. V. 321. P. 110960. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.110960.
- 33 Ioannou Sartzi M., Drettas D., Stramarkou M., Krokida M. A Comprehensive Review of the Latest Trends in Spray Freeze Drying and Comparative Insights with Conventional Technologies // *Pharmaceutics*. 2024. V. 16. № 12. P. 1533. doi: 10.3390/pharmaceutics16121533.
- 34 Троянkin А.Ю. Процесс получения макропористых частиц гидрогелей на основе поливинилового спирта: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2012. 18 с.
- 35 Leuenberger H., Plitzko M., Puchkov M. Spray freeze drying in a fluidized bed at normal and low pressure // *Drying Technology*. 2006. V. 24. № 6. P. 711–719. doi: 10.1080/07373930600684932.
- 36 Meridion Technologies. URL: <http://meridion-technologies.de/de/produkte.php> (дата обращения: 25.08.2025).
- 37 Adali M.B., Barresi A.A., Boccardo G., Pisano R. Spray Freeze-Drying as a Solution to Continuous Manufacturing of Pharmaceutical Products in Bulk // *Processes*. 2020. V. 8. № 6. P. 709. doi: 10.3390/pr8060709.
- 38 Ramos F.M., Júnior V.S., Prata A.S. Impact of vacuum spray drying on encapsulation of fish oil: Oxidative stability and encapsulation efficiency // *Food Research International*. 2021. V. 143. P. 110283. doi: 10.1016/j.foodres.2021.110283.
- 39 Sobulska M., Wawrzyniak P., Woo M.W. Superheated Steam Spray Drying as an Energy-Saving Drying Technique: A Review // *Energies*. 2022. V. 15. № 22. P. 8546. doi: 10.3390/en15228546.





## References

- 1 Lykov M.V., Leonchik B.I. Spray dryers. Fundamentals of theory and calculation. Moscow: Mashinostroenie, 1966. 331 p. (in Russian).
- 2 Filková I., Huang L.X., Mujumdar A.S. Industrial spray drying systems. Handbook of industrial drying, 2006. vol. 3. pp. 215–256.
- 3 Camacho-Lie M. et al. Factors influencing droplet size in pneumatic and ultrasonic atomization and its application in food processing. Discover Food. 2023. vol. 3. no. 1. 23. doi: 10.1007/s44187-023-00065-5
- 4 Ziaee A. et al. Spray drying of food: principles and applications. Drying Technology in Food Processing. Cambridge: Woodhead Publishing, 2023. pp. 23–155. doi: 10.1016/B978-0-12-819895-7.00010-9
- 5 Bhandari B.R., Patel K.C., Chen X.D. Spray drying of food materials-process and product characteristics. Drying technologies in food processing. 2008. vol. 4. pp. 113–157.
- 6 Timonin A.S., Bozhko G.V., Borshchev V.Ya. et al. Equipment for oil and gas refining, chemical and petrochemical production: a textbook for universities in two books. Book 2. Vologda: Infra-Engineering, 2019. 476 p. (in Russian).
- 7 Akulich P.V. Calculations of drying and heat exchange units. Minsk: Belarusian Science, 2010. 443 p. (in Russian).
- 8 Khaire R.A., Gogate P.R. Novel approaches based on ultrasound for spray drying of food and bioactive compounds. Drying Technology. 2021. vol. 39. no. 12. pp. 1832–1853. doi: 10.1080/07373937.2020.1804926
- 9 RPM Solutions, Inc. Company website. Available at: <https://www.rpmsolutions.com/products-services/atomizer-parts-new/240mm-titanium-wheel/> (accessed 12.09.2025).
- 10 GEA. Company website. Available at: <https://www.gea.com/en/assets/170518/> (accessed 12.09.2025).
- 11 Salman A.D., Hounslow M., Seville J.P.K. (eds.). Granulation. Amsterdam: Elsevier, 2006. vol. 11.
- 12 Spraying Systems Co. Company website. Available at: [https://www.spray.com/-/media/dam/industrial/usa/sales-material/product-market-bulletin/b695c\\_spraydry\\_bulletin.pdf](https://www.spray.com/-/media/dam/industrial/usa/sales-material/product-market-bulletin/b695c_spraydry_bulletin.pdf) (accessed 12.09.2025).
- 13 Hoerbiger. Company website. Available at: <https://www.piezoproductions.com/products-solutions/ultrasonic-atomizers/> (accessed 12.09.2025).
- 14 Lastow O., Andersson J., Nilsson A., Balachandran W. Low-Voltage Electrohydrodynamic (EHD) Spray Drying of Respirable Particles. Pharmaceutical Development and Technology. 2007. vol. 12. no. 2. pp. 175–181. doi: 10.1080/10837450701212594
- 15 Chutani D., Huppertz T., Murphy E. Application of Electric Field Technologies in the Manufacture of Food Powders and the Retention of Bioactive Compounds. Powders. 2023. vol. 2. no. 1. pp. 135–150. doi: 10.3390/powders2010010
- 16 Cal K., Sollohub K. Spray drying technique. I: Hardware and process parameters. Journal of pharmaceutical sciences. 2010. vol. 99. no. 2. pp. 575–586. doi: 10.1002/jps.21886
- 17 Boda S.K., Li X., Xie J. Electro spraying an enabling technology for pharmaceutical and biomedical applications: A review. Journal of aerosol science. 2018. vol. 125. pp. 164–181. doi: 10.1016/j.jaerosci.2018.04.002
- 18 Bhushani J.A., Anandharamakrishnan C. Electrospinning and electro spraying techniques: Potential food based applications. Trends in Food Science and Technology. 2014. vol. 38. no. 1. pp. 21–33. doi: 10.1016/j.tifs.2014.03.004
- 19 Masum A.K.M., Saxena J., Zisu B. Electrostatic spray drying of high oil load emulsions, milk and heat sensitive biomaterials. Food Engineering Innovations Across the Food Supply Chain. 2022. pp. 237–246. doi: 10.1016/B978-0-12-821292-9.00022-4
- 20 Jayaprakash P. et al. Encapsulation of bioactive compounds using competitive emerging techniques: Electro spraying, nano spray drying, and electrostatic spray drying. Journal of Food Engineering. 2023. vol. 339. 111260. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111260
- 21 Zisu B., Masum A.K.M., Pham B.L., Thenin M., Maudhuit A., Beaupeux E., Ackerman T.E., Rusch J.T., Wee Sit L.J. Electrostatic spray dried active compound powders and production method thereof. U.S. Patent No. US20230240314A1, 2023.
- 22 Bellinghausen R. Spray drying from yesterday to tomorrow: An industrial perspective. Drying Technology. 2019. vol. 37. no. 5. pp. 612–622. doi: 10.1080/07373937.2018.1517778
- 23 Wawrzyniak P., Jaskulski M., Piatkowski M., Sobulska M., Zbicinski I., Egan S. Experimental detergent drying analysis in a counter-current spray dryer with swirling air flow. Drying Technology. 2019. vol. 38. no. 1–2. pp. 108–116. doi: 10.1080/07373937.2019.1626878
- 24 Jiang N., Kumar G.D., Chen J., Mishra A., Solval K.M. Comparison of concurrent and mixed-flow spray drying on viability, growth kinetics and biofilm formation of *Lactobacillus rhamnosus* GG microencapsulated with fish gelatin and maltodextrin. LWT. 2020. vol. 124. 109200. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109200
- 25 Santos D., Mauricio A.C., Sencadas V. et al. Spray Drying: An Overview. Biomaterials – Physics and Chemistry. New Edition. 2018. doi: 10.5772/intechopen.72247
- 26 Samborska K., Poozesh S., Barańska A., Sobulska M., Jedlińska A., Arpagaus C., Malekjani N., Jafari S.M. Innovations in spray drying process for food and pharma industries. Journal of Food Engineering. 2022. vol. 321. 110960. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.110960
- 27 Mujumdar A.S. An overview of innovation in industrial drying: current status and R&D needs. Transport in Porous Media. 2007. vol. 66. no. 1–2. pp. 3–18. doi: 10.1007/s11242-006-9018-y
- 28 Dantas A., Piella-Rifà M., Pontes Costa D., Felipe X., Gou P. Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application. Applied Food Research. 2024. vol. 4. no. 1. 100382. doi: 10.1016/j.afres.2023.100382
- 29 Wu Z., Yue L., Li Z., Li J., Mujumdar A.S., Rehkopf J.A. Pulse combustion spray drying of egg white: energy efficiency and product quality. Food and Bioprocess Technology. 2014. vol. 8. no. 1. pp. 148–157. doi: 10.1007/s11947-014-1384-9
- 30 Boel E., Koekoek R., Dedroog S., Babkin I., Vetrano M.R., Clasen C., Van den Mooter G. Unraveling Particle Formation: From Single Droplet Drying to Spray Drying and Electro spraying. Pharmaceutics. 2020. vol. 12. no. 7. 625. doi: 10.3390/pharmaceutics12070625
- 31 Piñón-Balderrama C.I., Leyva-Porras C., Terán-Figueroa Y., Espinosa-Solis V., Álvarez-Salas C., Saavedra-Leos M.Z. Encapsulation of Active Ingredients in Food Industry by Spray-Drying and Nano Spray-Drying Technologies. Processes. 2020. vol. 8. no. 8. 889. doi: 10.3390/pr8080889
- 32 Samborska K., Poozesh S., Barańska A., Sobulska M., Jedlińska A., Arpagaus C., Malekjani N., Jafari S.M. Innovations in spray drying process for food and pharma industries. Journal of Food Engineering. 2022. vol. 321. 110960. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2022.110960

- 33 Ioannou Sartzi M., Drettas D., Stramarkou M., Krokida M. A Comprehensive Review of the Latest Trends in Spray Freeze Drying and Comparative Insights with Conventional Technologies. *Pharmaceutics*. 2024. vol. 16. no. 12. 1533. doi: 10.3390/pharmaceutics16121533
- 34 Troyankin A.Yu. The process of obtaining macroporous hydrogel particles based on polyvinyl alcohol. Abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences. Moscow: Mendelev University of Chemical Technology of Russia, 2012. 18 p. (in Russian).
- 35 Leuenberger H., Plitzko M., Puchkov M. Spray freeze drying in a fluidized bed at normal and low pressure. *Drying Technology*. 2006. vol. 24. no. 6. pp. 711–719. doi: 10.1080/07373930600684932
- 36 Meridion Technologies. Company website. Available at: <http://meridion-technologies.de/de/produkte.php> (accessed 25.09.2025).
- 37 Adali M.B., Barresi A.A., Boccardo G., Pisano R. Spray Freeze-Drying as a Solution to Continuous Manufacturing of Pharmaceutical Products in Bulk. *Processes*. 2020. vol. 8. no. 6. 709. doi: 10.3390/pr8060709
- 38 Ramos F.M., Júnior V.S., Prata A.S. Impact of vacuum spray drying on encapsulation of fish oil: Oxidative stability and encapsulation efficiency. *Food Research International*. 2021. vol. 143. 110283. doi: 10.1016/j.foodres.2021.110283
- 39 Sobulska M., Wawrzyniak P., Woo M.W. Superheated Steam Spray Drying as an Energy-Saving Drying Technique: A Review. *Energies*. 2022. vol. 15. no. 22. 8546. doi: 10.3390/en15228546

**Сведения об авторах**

**Анастасия В. Мосюрова.** инженер, кафедра химического и фармацевтического инжиниринга, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, г. Москва, 125480, Россия, mosiurova.a.v@muctr.ru  
 <https://orcid.org/0009-0008-2032-6821>

**Наталья В. Меньшутина** д.т.н., профессор, зав. кафедрой, кафедра химического и фармацевтического инжиниринга, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, г. Москва, 125480, Россия, chemcom@muctr.ru  
 <https://orcid.org/0000-0001-7806-1426>


**Вклад авторов**


Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Information about authors**

**Anastasiia V. Mosyurova** engineer, chemical and pharmaceutical engineering department, Mendelev University of Chemical Technology of Russia, st. Geroev Panfilovtsev, 20, Moscow, 125480, Russia, mosiurova.a.v@muctr.ru  
 <https://orcid.org/0009-0008-2032-6821>

**Natalia V. Menshutina** Dr. Sci. (Engin.), professor, head of the department, chemical and pharmaceutical engineering department, Mendelev University of Chemical Technology of Russia, st. Geroev Panfilovtsev, 20, Moscow, 125480, Russia, chemcom@muctr.ru  
 <https://orcid.org/0000-0001-7806-1426>

**Contribution**

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

|                             |                                       |                                    |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Поступила</b> 04/08/2025 | <b>После редакции</b> 10/08/2025      | <b>Принята в печать</b> 03/09/2025 |
| <b>Received</b> 04/08/2025  | <b>Accepted in revised</b> 10/08/2025 | <b>Accepted</b> 03/09/2025         |