

УДК 66.01:532

Современные направления научных исследований и технические решения по интенсификации процесса сублимационной сушки в пищевой промышленности, фармпроизводствах и прикладной биотехнологии (Часть 1)

Д-р техн. наук Семенов Г.В. sgv47@yandex.ru
канд. техн. наук Булкин М.С. mabul25@mail.ru
Кузенков А.В.

Московский государственный университет пищевых производств
125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11

Тенденция энергосбережения отражает общемировые направления развития всех перерабатывающих отраслей промышленности, включая пищевые и фармацевтические производства. Функцией данной обзорной статьи является оценка современного состояния и выбор перспективных направлений исследований с целью интенсификации и повышения энергоэффективности сублимационной сушки и снижения затрат на производство высушенных продуктов, а также повышения их качества в пищевой промышленности, отраслях прикладной биотехнологии и производстве лекарственных препаратов. В статье представлен первая часть обзора современных направлений научных исследований, а также технических решений на их основе в области интенсификации и повышения энергоэффективности сублимационной сушки в различных отраслях промышленности. Работа выполнена в рамках гранта № 14.577.21.0044 "Разработка новых энергосберегающих технологий и процессов для вакуумной сублимационной сушки широкого спектра термолабильных материалов, создание на их основе опытно-промышленного образца сушильного устройства для пищевой промышленности и прикладной биотехнологии" (идентификационный номер RFMEF157714X0044).

Ключевые слова: сублимационная сушка, вакуумное обезвоживание, интенсификация, теплообмен, массообмен, энергоэффективность.

Modern research trends and technical solutions for the intensification of the process of freeze-drying in the food industry, pharmaceutical production and Applied Biotechnology (Part 1)

D.Sc. Semenov G.V. sgv47@yandex.ru
Ph.D. Bulkin M.S. mabul25@mail.ru
Kuzenkov A.V.

Moscow State University of Food Production
125080, Moscow, Volokolamsk Highway 11

Energy-saving trend reflects global trends of development of processing industries, including food and pharmaceutical industries. The function of this review article is to assess the current state and selection of promising areas of research in order to intensify and improve the energy efficiency of freeze-drying and reduce the cost of production of dried products, as well as improve their quality in the food industry sectors of applied biotechnology and manufacturing drugs. The article presents the first part of the review of contemporary research areas, as well as technical solutions based on them in the field of energy efficiency and intensification of freeze-drying in a variety of industries. Work performed under the grant № 14.577.21.0044 "The development of new energy-saving technologies and processes for the vacuum freeze-drying a wide range of heat-sensitive materials, building on their basis of pilot sample drying device for the food industry and Applied Biotechnology" (identification number RFMEF157714X0044).

Keywords: freeze drying, vacuum dehydration, intensification, heat transfer, mass transfer, energy efficiency.

Вопросы энергосбережения в процессах вакуумного обезвоживания занимают центральное место в работах отечественных и зарубежных исследователей. Эта тенденция отражает общемировые направления развития всех перерабатывающих отраслей, включая пищевые и фармпроизводства. Целью данной обзорной статьи является оценка современного состояния и перспективных направлений исследований с целью интенсификации и повышения энергоэффективности сублимационной сушки и снижения затрат на производство

высушенных продуктов, а также повышения их уровня качества в пищевой промышленности, отраслях прикладной биотехнологии и производстве лекарственных препаратов.

Как известно, технология вакуумной сублимационной сушки включает три взаимосвязанных этапа:

- первый из них, предварительное замораживание (или самозамораживание) объектов сушки;
- на втором этапе осуществляется удаление замороженной влаги фазовым переходом «лёд-пар»;
- третий заключительный этап – удаление испарением оставшейся незамороженной влаги, доведение конечной влажности материала до заданного уровня.

На первом этапе осуществляется формирование кристаллической структуры, при этом форма и размер кристаллов льда, их распределение в замороженном материале, изменение физико-химических показателей зависит от режимных параметров процесса и свойств объектов замораживания. Замораживание оказывает решающее влияние на уровень качества сублимированных продуктов и интенсивность последующего процесса обезвоживания. Вопросам замораживания в технологии консервирования термолабильных материалов в использовании вакуумной сублимационной сушки посвящена обширная литература [14, 38, 41, 64].

Примером такой работы служит диссертация ученого из Египта Хуссейна Мохамеда Маграбие Слама [43], посвященная совершенствованию процесса замораживания в технологии вакуумной сублимационной сушки пищевых продуктов с использованием низкотемпературного воздуха от турбохолодильной машины. Автором предложено при осуществлении предварительного замораживания использование низкотемпературного воздуха от турбохолодильной машины, как фактора снижения энергозатрат и повышения уровня качества пищевых продуктов. В работе предложена математическая модель расчета продолжительности процесса замораживания низкотемпературным воздухом пищевых продуктов при симметричных и несимметричных условиях теплообмена с использованием интегрального метода теплового баланса и квадратичного полинома распределения температуры при решении уравнения теплопроводности. Получены экспериментальные данные основных параметров процесса замораживания биопродукта - пшеничной клейковины, с использованием низкотемпературного воздуха от турбохолодильной машины. Разработаны номограммы, необходимые для выбора режимов замораживания в технологии вакуум - сублимационной сушки, а также в технологии быстрого замораживания пищевых продуктов, позволяющие определить продолжительность процесса (t) в интервалах температур воздуха ($t_{cp} = -60 \div -120$ °C), толщин продукта ($L = 0,02 \div 0,1$ м), начальной его температуры ($t_{нач} = 5 \div 25$ °C) и значений коэффициента несимметрии теплообмена ($\kappa = 1,0; 1,5; 2,0$). Применение предложенного автором в качестве предварительного замораживания замораживание низкотемпературным воздухом ($t_{cp} = -60$ °C) от турбохолодильной машины позволило сократить продолжительность дальнейшей сублимационной сушки на 25 %, и на 50 % — общую продолжительность процесса (замораживание + сушка) в сравнении с режимом традиционного замораживания в условиях кондуктивного теплообмена при температуре ($t_{cp} = -30$ °C).

Наибольшим по длительности и величине энергозатрат является второй этап, который осуществляется непосредственно в сушильной камере сублимационной установки. К объекту подводится энергия (кондукцией, радиацией, СВЧ-полем или их сочетанием), начинается процесс сушки, по мере развития которого на поверхности материала формируется высохший слой с низкой теплопроводностью. Для пищевых продуктов её характерное значение лежит в диапазоне 0,03-0,06 Вт/м*К, т.е. как у хороших теплоизоляционных материалов. Фронт сублимации перемещается от поверхности к центру, толщина высохшего слоя увеличивается. Это не позволяет подводить кондукцией или радиацией большие тепловые потоки, чтобы не вызвать повышение температуры уже высохших частей сверх допустимых значений. Такая закономерность процесса породила ряд технических решений, направленных на разрушение сохнувшего слоя. Одной из наиболее значимых работ, выполненных научной школой под руководством Антипова С.Т. [6,7] в Воронежском государственном университете инженерных технологий является работа Шахова С.В. [46], которая посвящена созданию научных подходов, направленных на интенсификацию процесса и снижению энергозатрат на производство сублимированных продуктов путем сокращения продолжительности цикла сушки на 40-50 %. Снижение потребления материальных и энергетических ресурсов достигается автором путем моделирования и оптимизации функционирования исследуемой технологической системы, а также путем создания модели подготовительных процессов: выделения и концентрирования целевых компонентов из пищевых сред, создания развитой поверхности (рассмотрены вопросы создания развитой поверхности раздела фаз пищевых сред вспениванием и измельчением), замораживания (предложен непрерывный ввод жидкого продукта в сублиматор путем нанесения его сплошным слоем на подвижную поверхность, например, на валок сублимационной сушилки). Шаховым С.В. разработана модель нагрева инфракрасным излучением слоя гранул во вращающемся барабане вакуум-сублимационной сушилки. Предложена качественная и количественная оценка распределения энергии проникающего лучистого потока внутри комбинированной гранулы, состоящей из инертного носителя и слоя замороженного материала, а также метод численного расчета профиля слоя гранул и времени перемещения отдельной гранулы вдоль барабана в установке непрерывного действия. Также автором предложены математические модели внутреннего массообмена в материале с развитой пористой структурой в поле СВЧ и процессов кристаллизации и плавления влаги в объеме высокопористого материала, предложены способы численной реализации этих моделей. Предложенная математическая модель нагрева высокопористого материала

в поле СВЧ, позволяет учесть зависимость диэлектрических свойств материала от его текущего состава и структуры. Автором изучены основные закономерности тепло- и массообмена в процессах вакуум-сублимационного обезвоживания продукта с использованием источников низкопотенциальной энергии.

Помимо созданного авторским коллективом комплекса экспериментальных стендов, предложены схемы и разработаны образцы установок, обеспечивающих вакуумное сублимационное обезвоживание, работающие в автоматическом режиме по энергосберегающей технологии с выдерживанием заданных качественных показателей продукта на выходе из аппаратов. При разработке новых технических решений для обеспечения проведения процессов сублимационной сушки пищевых сред Шаховым С.В. были реализованы следующие направления интенсификации:

-использование испарительного замораживания (рисунок 1);

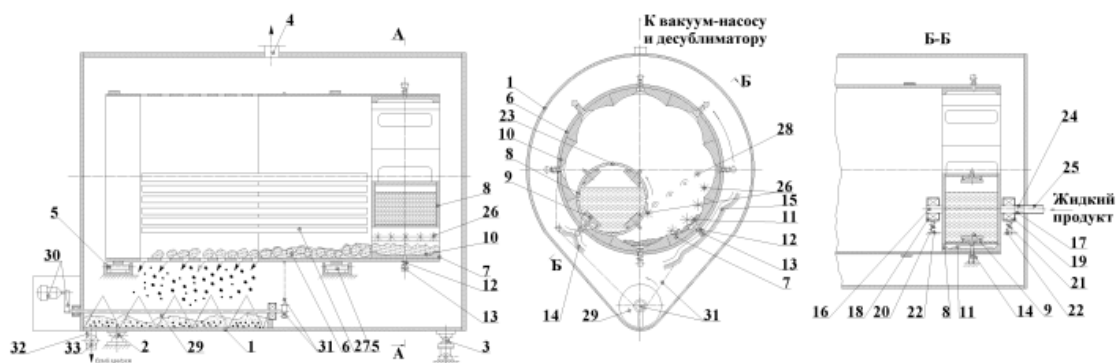


Рис. 1 - Барабанная вакуум-сублимационная сушилка с непосредственным вводом жидкого продукта посредством клапанной системы в вакуумную камеру: 1 – корпус; 2 – шарнир; 3 – устройство для изменения угла наклона сушилки к горизонту; 4 – патрубок; 5 – опорные ролики; 6 – барабан; 7 – насадки; 8 – барабанный дозатор; 9 – подпружиненный клапан; 10 – овалообразное углубление; 11 – эластичные мембраны; 12 – толкатель; 13 – ролик; 14, 15 – неподвижный копир; 16, 17 – полые валы; 18, 19 – подшипники качения; 20, 21 – пружины растяжения; 22 – неподвижная опора; 23 – пазы; 24 – гофрированный гибкий патрубок; 25 – трубопровод; 26 – цилиндрические щетки, 27 – панель; 28 – источники инфракрасного нагрева; 29 – разгрузочный шнек 30 – привод; 31 – цепная передача; 32 – разгрузочный патрубок; 33 – шлюзовой затвор.

- организация процесса с использованием инертных носителей (рисунок 2)

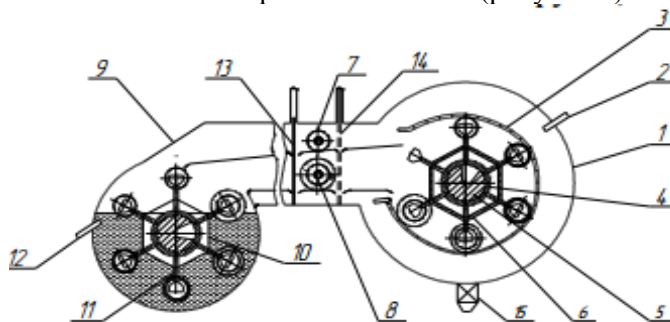


Рис. 2. Валковая вакуум-сублимационная сушилка, предложенная Шаховым С.В.: 1 – сушильная камера; 2 – патрубок для отвода паров, 3 – ситовый цилиндр, 4 – ротор, 5 – неподвижный вал; 6 – держатели; 7 – торцевые крышки; 8 – подпружиненные штоки; 9 – клапаны, 10 – копиры, 11 – валки; 12 – полые оси; 13 – клапаны; 14 – намораживатель; 15 – ротор; 16 – неподвижный вал, 17 – гибкие трубопроводы; 18 – обратные клапаны; 19 – патрубок для ввода жидкого продукта, 20, 21 – шиберы, 22 – шлюзовые затворы, 23 – источники ИК-нагрева.

- организация процесса сублимационной сушки пищевых сред в тонком слое с развитой поверхностью (рисунок 3) [24,32].

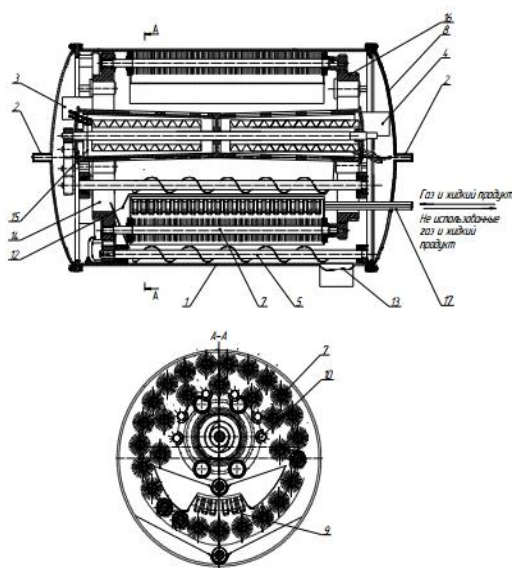


Рис. 3. - Установка для непрерывной сублимационной сушки вспененных жидких продуктов, предложенная Шаховым С.В.: 1 – корпус; 2 – патрубки для отвода воздуха и неконденсирующихся газов; 3 – мотор-редуктор; 4 – мотор-редуктор; 5, 6- транспортеры для удаления продукта из камеры; 7 – носители продукта; 8 – крышки; 9 – пеногенераторы, 10 – источники энергоподвода, 11 – щетки; 12 – поддон для сбора высохшего продукта; 13 – затвор; 14, 16 – венцовые шестерни, 15 – десублиматор; 17 – патрубки для отвода излишков газа и жидкости

Подобные установки могут иметь носители, выполненные в виде подвижных элементов, форма которых имеет развитую пространственную структуру, установленных с возможностью регулируемого вращения при помощи привода [22]. Интенсификация процесса достигается за счет эффективного энергоподвода к пенному продукту, имеющему развитую структуру.

Рассмотренные технические решения являются достаточно эффективными, однако их применение ограничено теми случаями, когда сохранение формы и размеров высушенных материалов является обязательным.

Значительные возможности интенсификации процессов вакуумной сублимационной сушки открываются в том случае, если удастся генерировать энергию непосредственно в замороженной зоне высушиваемых материалов с применением СВЧ-полей.

Применение в качестве нагрева тепловой энергии от СВЧ-источников является перспективным направлением, как в пищевой промышленности [35-37,67] в целом, так и для вакуумного испарения и сублимационной сушки, а также в комбинации этих режимов [6,61,62]. В работах Кретьова И.Т., Белозерцева А.С. также было предложено использовать для вакуум-сублимационного обезвоживания пищевых продуктов энергию сверхвысокочастотного (СВЧ) поля. Характер СВЧ-нагрева позволяет резко интенсифицировать процессы тепло- и массообмена, так как прогрев продукта происходит по всему объему и градиенты температуры и влажности совпадают по направлению [20]. Также СВЧ нагрев используют в комбинации другими способами энергоподвода, например, ИК-нагрев, ультразвук. Нагрев тел, в частности пищевых продуктов, в электромагнитном поле отличается от нагрева их за счет теплопроводности или конвекции тем, что элементы среды, разделяющей генераторы электромагнитных колебаний и объекты нагрева, как правило, не участвуют в переносе теплоты. Теплота возникает в самих объектах нагрева при их взаимодействии с электромагнитным полем. СВЧ нагрев – это использование энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты с диапазоном частот $3 \cdot 10^8 - 5 - 3 \cdot 10^{10}$ Гц. В работе [37] авторами обобщены преимущества СВЧ нагрева, перед традиционными способами энергоподвода:

- высокая скорость нагрева и его равномерность вследствие «объемной» подачи тепла;
- сохранение витаминов и других незаменимых нутриентов пищевого продукта;
- возможность мягкого режима термообработки, подачи тепла импульсами, т.е. ступенчатого нагрева;
- создание заданной температурной неравномерности при термообработке пищевых продуктов путем подбора формы рабочих органов СВЧ-генератора или применением заслонов (экранов), регулирующих пропускание микроволн к продукту;
- высокая экономичность процесса (отсутствие контакта с теплоносителем и генерация тепла в самом продукте сводят к минимуму потери тепла на нагрев оборудования и во внешнюю среду; потребление электроэнергии СВЧ-генераторами значительно меньше, чем другими нагревательными приборами);

В Германии ряд исследований посвящен сублимационной сушке с использованием СВЧ нагрева [61,62]. Из-за ограниченного проникновения тепла при классической сушке, эксперименты по микроволновой сублимационной сушке проводились уже в 60-х годах Берком и Декаро в 1964 и Копсоном в 1962). В процессе

СВЧ-нагрева теплота генерируется непосредственно в объеме продукта, таким образом, происходит сублимация по всему объему продукта. При микроволновой сублимационной сушке, энергия поглощается в основном органическими молекулами в продукте. Микроволновая сублимационная сушка является более эффективным и быстрым процессом, чем классическая. Эксперименты показывают, что при использовании микроволновой сублимационной сушки вымораживанием, затраты на сушку могут быть уменьшены (Ву и др., 2004, Дуань и др., 2010). Самым большим преимуществом для применения микроволн является быстрое внедрение энергии во всем объеме продукции в глубины проникновения. В замороженном состоянии воды при температурах ниже -5°C увеличивается глубина проникновения микроволн и они могут охватывать весь объем овощей и фруктов, также дисперсных насыпных продуктов до порядка 20-40 см. Сублимационная сушка в СВЧ-поле, как правило, имеет продолжительность около 1-4 часа, при начальной влажности 70-98% и 5-10% конечном содержании влаги в продукте.

В Ижевской государственной сельскохозяйственной академии под руководством проф. Касаткина В.В. проводится ряд научных исследований по применению в обезвоживании энергосберегающих электротехнологий. Так в работе [19] предложены способы испарительного самозамораживания и сублимационной сушки жидких термолабильных продуктов пищевого назначения на установках непрерывного действия с комбинированным энергоподводом в едином цикле, а также методы контроля, расчетов и оптимизации эффективности энергоподвода. Разработаны математические модели частных энерготехнологических процессов непрерывной сублимационной сушки гранулированного продукта с комбинированным энергоподводом, описывающие: испарительное самозамораживание жидких термолабильных продуктов пищевого назначения и ИК сушку криоранулянта в полете; сублимационную сушку гранул в полях СВЧ и УЗИ; досушку остаточной влаги в фильтрационном потоке инертного газа в поле УЗИ. Автором создан опытный образец лабораторной непрерывно действующей сублимационной установки с производительностью 1 кг/ч по испаряемой влаге УСС-НД-КЭ-Ж-01. Схема установки представлена на рисунке 4. Установка состоит из сушильной камеры цилиндрической формы с источниками УЗИ и СВЧ-энергии. В верхней части сушильной камеры расположена распылительная камера, на крышке которой закреплен ИК-излучатель. В камере находится десублиматор, также через шиберный заслон к ней подключен вакуумный насос. В нижней части камера подключена к выгрузному шнеку. Продукт дозатором-насосом подается и распыляется через ультразвуковую форсунку в распылительной камере. Капли продукта (автором используется сок) замерзают в процессе полета, при этом подвергаются воздействию лучистой энергии ИК-излучателя. Далее капли с высушенным верхним слоем летят в сушильную колонну. Агент сушки - инертный газ на стадии удаления остаточной влаги подается в нижнюю часть сушильной камеры из баллона через термостат. Установка оснащена датчиками давления, температуры, а также осуществляется отбор проб высушиваемого гранулированного сока.

В качестве промышленного образца предложена установка УСС-НД-КЭ-Ж-02. На разработанных установках реализован стадийный подвод энергии разных видов и экспериментально установлены рациональные энергетические параметры. Предложенные автором установки энергозатраты ниже по сравнению с контактной сублимацией в 2,8...3,3 раза.

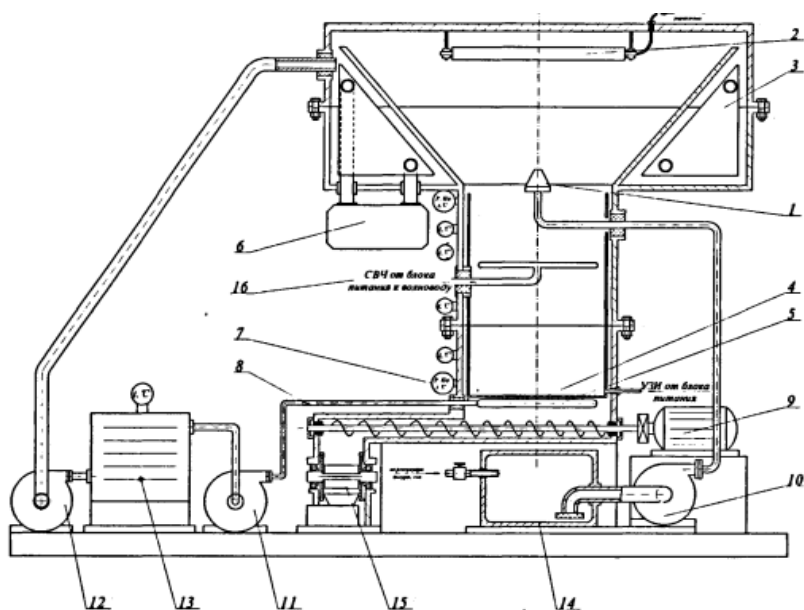


Рис. 4. Принципиальная схема лабораторной установки непрерывного действия для сублимационной сушки жидких термолабильных продуктов пищевого назначения УСС-НД-КЭ-Ж-01, разработанная коллективом В.В. Касаткина

Применение электротехнологий в процессах вакуумного обезвоживания также описано в работах Поспеловой И.Г. [33,34]. Рассмотрено вакуумное обезвоживание предварительно измельченных овощей и фруктов с применением СВЧ - и УЗИ - полей в принудительном фильтрационном потоке газа применительно к установкам непрерывного действия. В качестве объектов сушки использовались картофель и яблоки. Автором предложен непрерывный способ сублимационной сушки фруктов и овощей с предварительным измельчением и сортировкой в едином вакуумном цикле. Разработаны математические модели процессов скорозамораживания с последующей сублимационной сушкой и расчетная энергоемкость сушки мелкокускового материала с комбинированным энергоподводом. Исследованы условия проведения технологических операций измельчения и сортировки в вакууме при самозамораживании ($P = 10...30$ Па, $T_1 = -16...-30^{\circ}\text{C}$) и показана возможность их совмещения с сублимационной сушкой фруктов и овощей с применением СВЧ- и УЗИ- полей в принудительном потоке газа ($N_{\text{СВЧ}} = 5$ кВт, $f_{\text{СВЧ}} = 2450$ МГц, $N_{\text{УЗИ}} = 4$ кВт, $f_{\text{УЗИ}} = 18 \pm 2$ кГц, $t_2 = 20^{\circ}\text{C}$). Для сублимационной сушки мелкокускового продукта предложены следующие рациональные режимы: в полях СВЧ энергии ($N_{\text{СВЧ}} = 5$ кВт, $f_{\text{СВЧ}} = 2450$ МГц) и УЗИ ($I_{\text{УЗ}} = 130$ Дб, $N_{\text{УЗИ}} = 10$ Вт, $f_{\text{УЗИ}} = 18 \pm 2$ кГц) при принудительном и направленном фильтрационном потоке газа ($t_2 = 20...40^{\circ}\text{C}$).

Разработана установка непрерывного действия с предварительным измельчением, сортированием и сублимационной сушкой в вакууме кускообразных материалов (рисунок 5).

Результаты экспериментов показали, что при использовании операции сортировки влажность в верхних слоях продукта была ниже в среднем на 8 %, что позволило увеличить скорость сушки и повысить качество готового продукта.

При очевидных достоинствах, сублимационная сушка с применением СВЧ-нагрева имеет ряд недостатков. Проектирование и изготовление микроволновых сублимационных сушилок является очень сложной задачей из-за высокой вероятности при проектных ошибках может возникнуть СВЧ-плазма.

В основном плазма образуется, когда напряженность электрического поля в вакуумной камере превышает пробивную напряженность поля. Ионизация газа в вакуумной камере приводит к плазменным дугам, которые могут вызвать ожоги поверхности продукта.

Возникновение этого явления означает значительные потери энергии и перегрев в областях сухого продукта, в результате чего конечный продукт сильно поврежден. Предельное значение пробивной напряженности поля зависит от вакуума. Минимальное находится в диапазоне вакуумного давления, который используется для сублимационной сушки. Чтобы предотвратить возникновение плазменных дуг, необходимо оптимизировать параметры, что довольно проблематично. Использование в сублимационных установках СВЧ-энергоподвода ограничивается неизбежной неодинаковостью теплофизических характеристик, формы и размеров объектов сушки, а также сложностью технических решений по генерации равномерных СВЧ-полей по площади всей поверхности высушиваемых материалов [39]. Для широкого промышленного использования СВЧ-энергоподвода необходимо создание рациональных конструктивных решений, чтобы избежать описанных проблем.

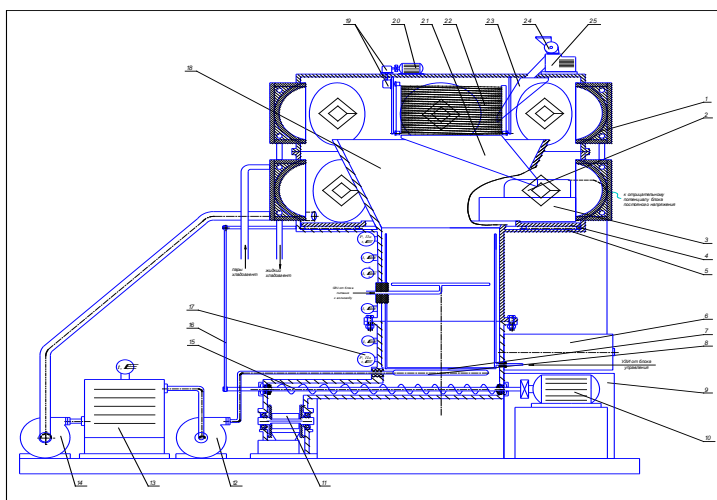


Рис. 5. Принципиальная схема установки сублимационной сушки мелкокусковых растительных материалов типа УСС-НД-КЭ-И непрерывного действия с комбинированным энергоподводом, предложенная Поспеловой И.Г.:

- 1 - охлаждаемый элемент десублиматора; 2 - окно для выгрузки льда; 3 - дека для съема льда с конвейера;
- 4 - конвейер карусельного типа для перемещения льда; 5 - ролик; 6,11,24 - вакуумные затворы; 7 - УЗ излучатель;
- 8 - напуск агента сушки; 9 - бункер плавитель льда; 10 - привод шнека и конвейера; 12 - насос подачи агента сушки;
- 13 - термостат; 14 - вакуумный насос; 15 - шнек выгрузки готового продукта; 16 - ременная передача;
- 17 - датчик давления и температуры; 18 - собирающая воронка; 19 - редуктор конический; 20 - привод сортировки;
- 21 - лоток обрезей; 22 - сортировка барабанная; 23 - лоток загрузочный; 25 -резательная машина.

Большое количество объектов сушки имеет жидкую и пастообразную консистенцию, что открывает возможности широкого использования процессов замораживания их в виде дисперсных частиц. Как правило, это предварительное замораживание в виде мелких частиц с определяющим размером $(2-4) \cdot 10^{-3}$ м и их последующая сушка в слое, либо непосредственный ввод распылением материала в вакуумируемое пространство.

Одним из примеров сочетания способов сушки и улучшения тепло- и массопереноса, с целью интенсификации процесса и снижения энергозатрат, является объединение процессов сублимационной и распылительной сушки в одном аппарате. Это трудно осуществимо в промышленном производстве ввиду недостатков существующих распылительных сублимационных установок: низкой эксплуатационной надежности вакуумно-распылительного гранулятора из-за возможности блокировки замороженным продуктом обогреваемой форсунки. Для устранения такого недостатка в [23,47] предложена сублимационная распылительная сушилка для обезвоживания жидких продуктов, показанная рисунке 6.

Установка состоит из сублимационной камеры 1 с патрубками 2 и 3 для подвода жидкого продукта и отвода водяных паров и неконденсирующихся газов, источников ИК-нагрева 4, шлюзового затвора 5 и гранулятора б. Гранулятор выполнен в виде испарительной камеры 7 с перегородкой 8, включающей испарительную ванну 9 с нагревателями 10, фокусирующих насадок 11, насоса 12, механической форсунки 13.

Повышение эксплуатационной надежности вакуумно-распылительного гранулятора, представляющего собой испарительную камеру, в которой установлены подводящий патрубок, имеющей фокусирующие насадки для подачи жидкого продукта, а также теплоподводящие элементы и шлюзовый затвор для выгрузки готового продукта в модернизированной установке, достигается за счет того, что гранулятор дополнительно снабжен испарительной ванной с нагревателями, к которой подключен насос, соединенный полыми патрубками с механической форсункой.

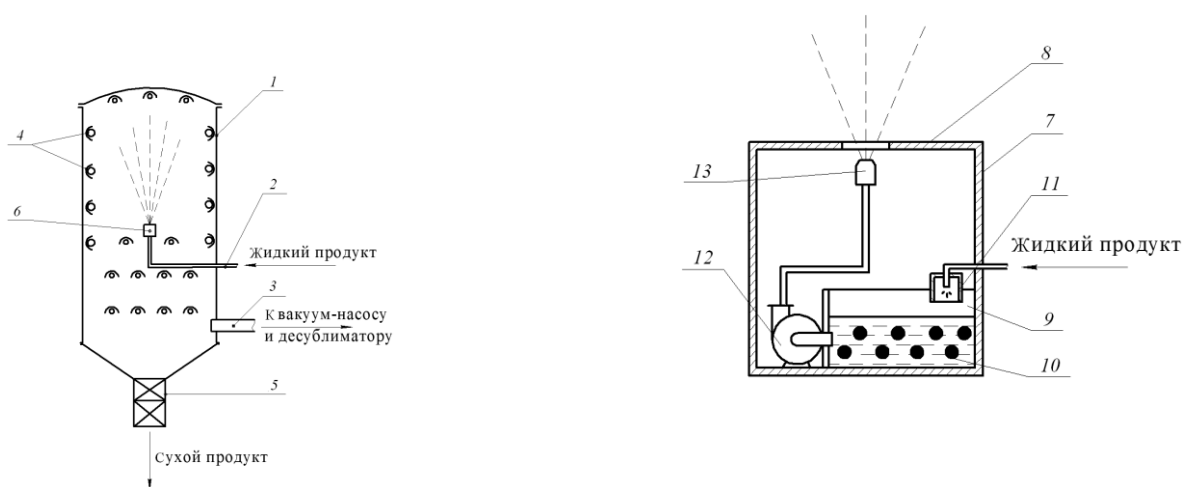


Рис. 6. Сублимационная распылительная сушилка для обезвоживания жидких продуктов и гранулятор

При этом она расположена соосно отверстию в перегородке, а диаметр круга, полученного при пересечении конуса распыла механической форсунки с плоскостью перегородки меньше диаметра отверстия. С учетом предлагаемой авторами модернизации, сушилка работает следующим образом. Жидкий продукт посредством патрубка 2 поступает в испарительную камеру 7 гранулятора б, где интенсивно испаряется и с помощью фокусирующих насадок 11, препятствующих его разбрызгиванию, поступает в испарительную ванну 9 с нагревателями 10, где происходит частичная концентрация раствора за счет вакуум-выпаривания. Далее продукт с помощью насоса 12 и механической форсунки 13 распыляется через отверстие в перегородке 8 в сублимационную камеру 1. Блокировки механической форсунки 13 не происходит, так как она расположена внутри испарительной камеры 7, где поддерживается давление выше давления тройной точки воды путем создания гидравлического сопротивления выходу паров посредством перегородки 8 отверстием. Далее распыленный продукт самозамораживается в сублимационной камере 1 и сушится под действием источников ИК-нагрева 4. Высушенный продукт выгружается из сушилки с помощью шлюзового затвора 5. Таким образом, предложенная конструкция, по мнению авторов, позволяет повысить энергоэффективность процесса сушки жидких продуктов за счет эффекта

самозамораживания и использования теплоты фазовых превращений как источника энергии для испарения влаги, а снабженный испарительной ванной гранулятор предотвращает блокировку обогреваемой форсунки замороженным продуктом, что значительно увеличивает эксплуатационную надежность распылительных вакуум-сублимационных сушилок.

Это направление является весьма перспективным для материалов, используемых в криохимических технологиях, оно уже получило ряд успешных технических воплощений.

Ещё одним многообещающим направлением повышения энергоэффективности вакуумной сублимационной сушки является предварительное удаление части влаги испарением её в вакууме с последующим самозамораживанием.

Активно развивается научное направление изучения процессов вакуумного обезвоживания в широком диапазоне давлений и других режимных параметров большого спектра объектов сушки в Московском государственном университете пищевых производств под руководством профессора Семенова Г.В. [42]. В последнее время защищен ряд диссертаций по данной тематике [10,12,18] и опубликовано много работ различной направленности [17,38,39,40,43].

Интересные результаты получены Иванченковой Т.А. [17,18,31] при совмещении в рамках единого цикла сушки вакуумного испарения и сушки сублимационной применительно к ферментированному мясу птицы. Данная работа отчасти является продолжением исследований в области вакуумного обезвоживания, проведенных Буданцевым Е.В. [10]. Иванченковой Т.А. предложена технология получения обезвоженного продукта из биомодифицированного белого куриного мяса. Изучено влияние трех вариантов вакуумного обезвоживания: традиционной сублимационной сушки, вакуумной сушки и обезвоживания в условиях совмещения этапов вакуумного и сублимационного влагоудаления в рамках единого цикла на функционально-технологические, структурно-механические и органолептические свойства сырья, а также влияние совокупности воздействия выбранного автором ферментного препарата и трех указанных вариантов вакуумной сушки на функционально-технологические и структурно-механические характеристики сырья. На основе оценки свойств характерных для обезвоженного белого мяса птицы предложен эффективный режим вакуумного обезвоживания, предусматривающий удаление на первом этапе 45-50 % влаги вакуумной сушкой при давлениях 900-1200 Па и, на втором этапе, оставшейся части влаги сублимационной сушкой до конечной влажности 1,5–2,0 %. Для сравнения энергоемкости рассмотренных способов сушки рассчитаны энергозатраты на 1 кг удаленной влаги (таблица 1).

Таблица 1

Энергозатраты на 1 кг удаленной влаги при различных вариантах сушки

Способы сушки	Время сушки, час	Энергозатраты на 1 кг удаленной влаги, кВт
Вакуумная сушка	7,8	2,3
Сублимационная сушка	10,5	2,7
Совмещенный режим	8,5	2,4

Сушка белого мяса птицы в условиях сочетания процессов вакуумного испарения и сублимации в едином цикле позволила на 19% сократить продолжительность процесса и снизить затраты энергии на 10,5%. В работе доказана эффективность использования данного способа для сушки мяса.

С целью интенсификации процесса и снижения энергозатрат коллективом Шабетника Г.Д. предложен способ [44] и установка [28] для осуществления процесса удаления влаги из продукта (если нет необходимости в сохранении геометрических размеров) методом холодной вакуумной сушки, сублимационной сушки и при совмещении в рамках одного цикла процессов удаления влаги в вакууме испарением на начальной стадии процесса с последующим переходом к сублимационной сушке на завершающем этапе. При этом качество продукта (биологическая ценность или активность) остается практически на уровне вакуумной сублимационной сушки. В работе Буданцева Е.В. [10] предложены методы расчетов и методы выбора соотношения режимных параметров вакуумной и сублимационной сушки по времени в рамках одного процесса.

Техническим результатом изобретенной Шабетником Г.Д. установки является обезвоживание продукта под действием вакуума без использования десублиматора на стадии досушки продукта. Установка имеет отводящий патрубок с вакуумными задвижками, соединяющий сублиматор с системой откачки неконденсирующихся газов, позволяющий проводить процесс сушки материала в режимах вакуумной сублимационной сушки и холодной вакуумной сушки. Схема установки представлена на рисунке 7.

Установка состоит из сублиматора в виде герметичной камеры 1, при этом сублиматор 1 выполнен в виде цилиндра с крышкой, внутри которого расположены теплопередающие плиты, выполняющие роль продуктовых полок 2 для размещения противней с продуктом, и соединена посредством патрубка 3 и вакуумной задвижки 4 с системой осушки (I), предназначенной для конденсации паров, выделяющихся в процессе сушки материалов в

сублиматоре 1. Система осушки паров (I) состоит из десублиматора 5, выполненного в виде цилиндра, внутри которого установлены испарительные батареи 6 холодильной машины, низкотемпературного компрессора 7, конденсатора 8 и соленоидного вентиля 9. Сублиматор соединен трубопроводами с системой нагрева и охлаждения продуктовых полок (II). Система нагрева и охлаждения продуктовых полок состоит из насоса 10, теплообменника 11 и охладителя 12. Установка включает вакуумную станцию (III), предназначенную для создания и поддержания в сублиматоре 1 рабочего давления и откачки парогазовой смеси и неконденсирующихся газов. Вакуумная станция состоит из вакуумных насосов 13 и 14, последовательно соединенных патрубками 15, 16 с вакуумными задвижками 17, 18.

Универсальность данной установки позволяет проводить сушку любых влагосодержащих материалов с использованием различных способов сушки под вакуумом: от выпаривания до вакуумной сублимационной сушки. Использование такой установки для вакуумной сушки биологических материалов приводит к уменьшению энергозатрат и позволяет значительно сократить общую продолжительность процесса сушки.

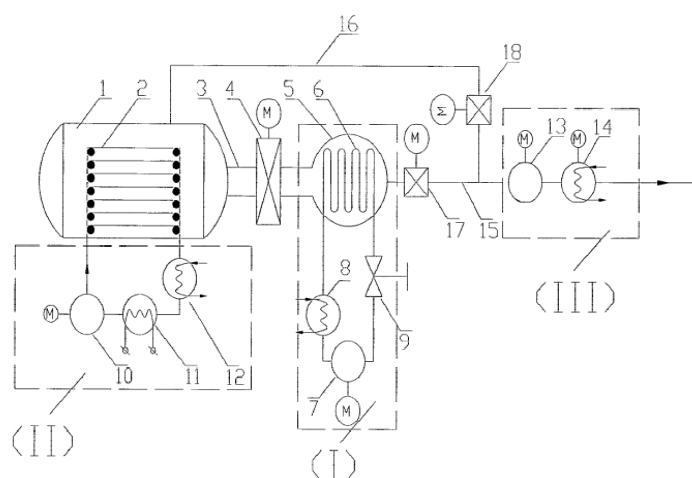


Рис. 7. Схема установки, предложенной Шабетником Г.Д.

Коллегами из Воронежа также предложено техническое решение для осуществления способа получения сублимированных пищевых продуктов с использованием паров азота (рисунок 8).

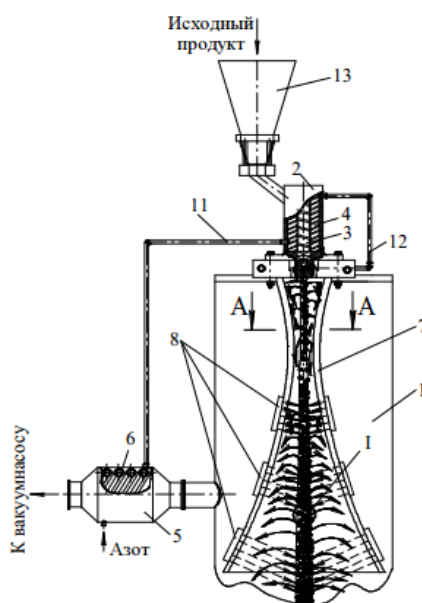


Рисунок 8 - Схема устройства для осуществления способа получения сублимированных пищевых продуктов с использованием паров азота: 1 – сублимационной камеры, 2 –экструдер, 3 –шнековая нагнетательная камера, 4 – полость с винтообразными каналами, 5 – выносной десублиматор; 6 – испаритель

Благодаря предложенной конструкции интенсификация процесса происходит за счет своевременного удаления молекул воды из зоны сублимации благодаря использованию инертного газа [22,29].

Перспективным является использование низкопотенциальной теплоты хладагента нагретого в компрессоре холодильной машины (рисунок 9,10). Этот способ повышения энергоэффективности процесса также рассмотрены в работах ученых из Воронежского государственного университета инженерных технологий.

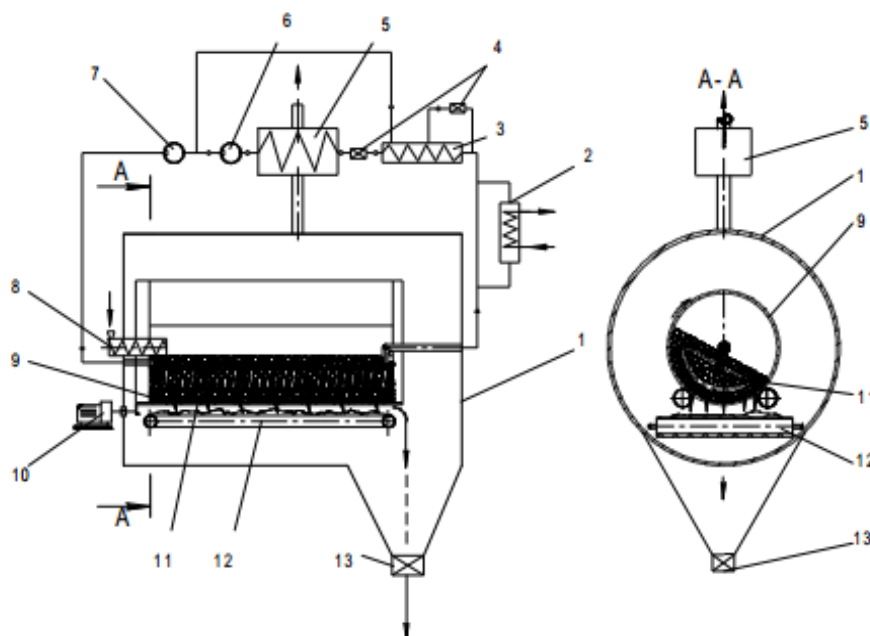


Рис. 9. Вакуум-сублимационная сушилка, работающая по принципу теплового насоса: 1 – сушильная камера, 2 – конденсатор, 3 – теплообменник промежуточного давления, 4 – терморегулирующие вентили, 5 – десублиматор, 6 – первая ступень компрессора, 7 – вторая ступень компрессора; 8 – шлюзовой затвор-питатель; 9 – барабан; 10 – привод; 11 – змеевик; 12 – ленточный транспортер, 13 – шлюзовой затвор

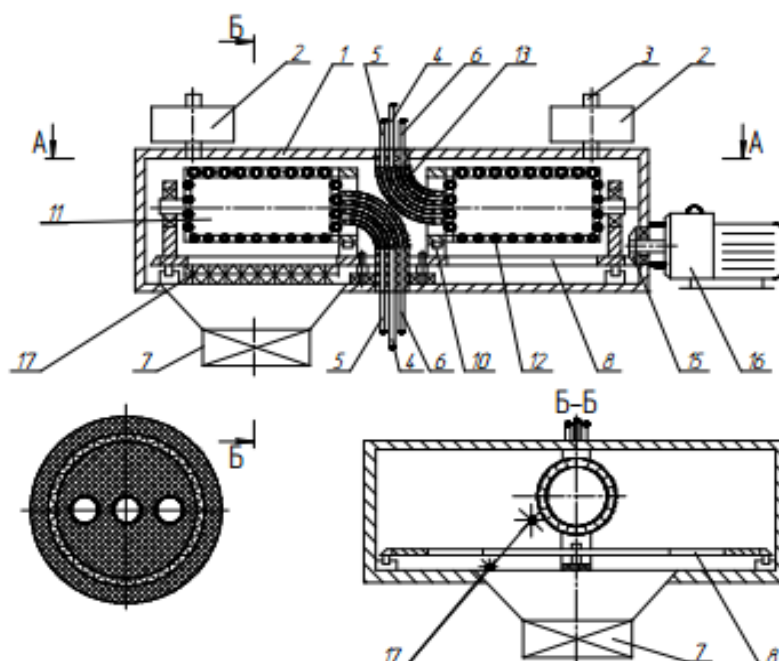


Рис. 10. Сублимационная сушилка с использованием теплоты хладагента нагретого в компрессоре холодильной машины для сушки: 1 – корпус, 2 – десублиматор; 3 – патрубки для отвода воздуха и неконденсирующихся газов, 4, 5, 6 – патрубки соответственно для подачи жидкого продукта, подачи хладоносителя и отвода хладоносителя; 7 – шлюзовый затвор для удаления сухого продукта из корпуса; 8 – рама, 9 – подшипники качения; 10 – ролики; 11 – барабаны. 12 – трубки с образованием перфораций; 13 – армированные шланги, 14 – зубчатая рейка, 15 – шестеренка; 16 – привод, 17 – щетки

Схожая по принципу работы установка для вакуумной сублимационной сушки с использованием низкопотенциальной теплоты горячего хладагента предложена в работе Бокадарова С.А. [9].

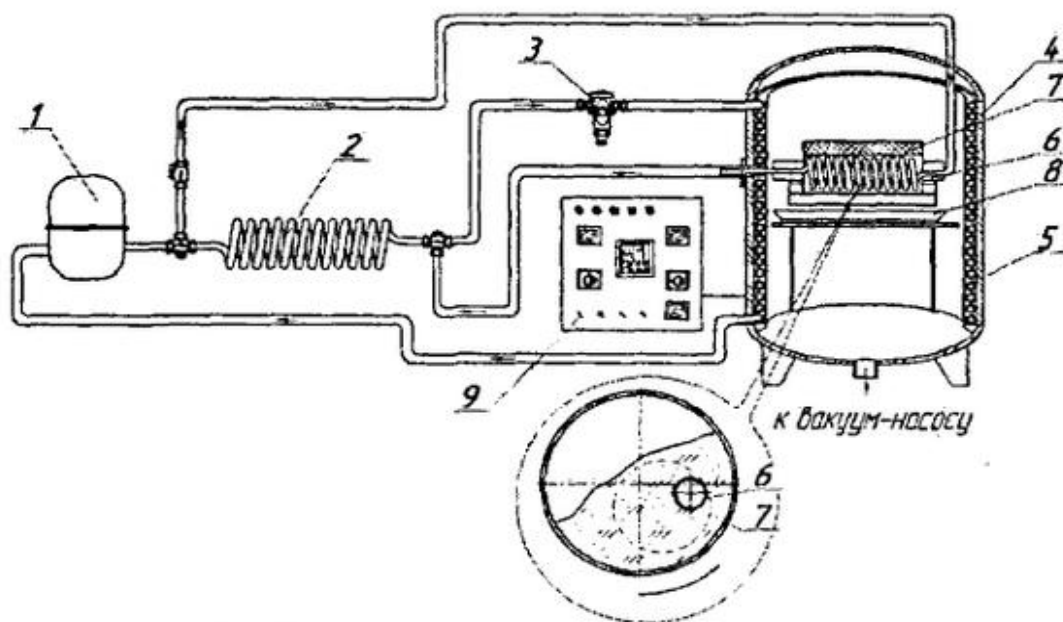


Рис. 11. Пилотная вакуум-сублимационная установка с энергоподводом от нагретого в холодильной машине хладагента: 1- компрессор холодильной машины; 2- конденсатор; 3 - терморегулирующий вентиль; 4 - корпус сушилки; 5 - десублиматор; 6 - теплопередающее устройство; 7 - барабан; 8 - поддон; 9 - пульт управления

Принцип работы подобных установок заключается в том, что энергоподвод к продукту осуществляется нагретым в компрессоре холодильной машины хладагентом. Сжатый до высокого давления и температуры хладагент из компрессора направляется в теплопередающее устройство, которое передает теплоту продукту, осуществляя сублимацию влаги из него. По мнению авторов применение такого технического решения значительно снижает энергозатраты по сравнению с традиционными промышленными установками, использующими кондуктивный и радиационный энергоподвод. Также в дальнейшем предлагается от работы конденсатора, используя сконденсировавшийся хладагент из теплопередающего устройства для охлаждения десублиматора.

Для эффективного удаления паров из зоны сублимации к поверхности десублимации Шаховым С.В.[46] предложены: конденсатор-вымораживатель (рисунок 12) и способ сушки термолабильных продуктов с использованием геттеров (газопоглощающих материалов) (рисунок 13).

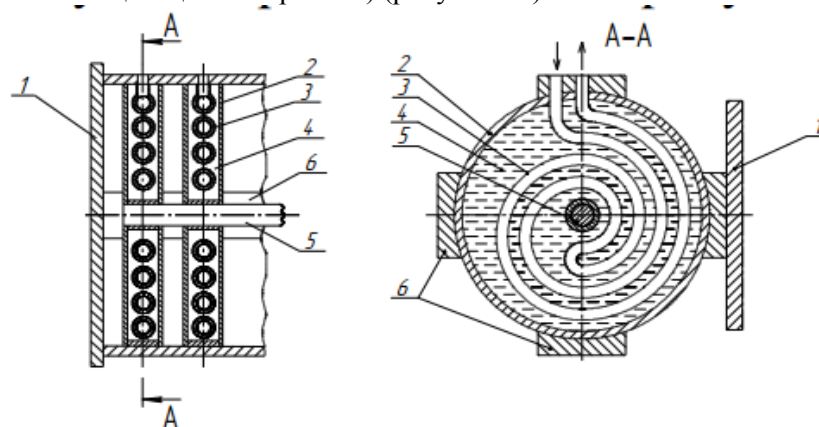
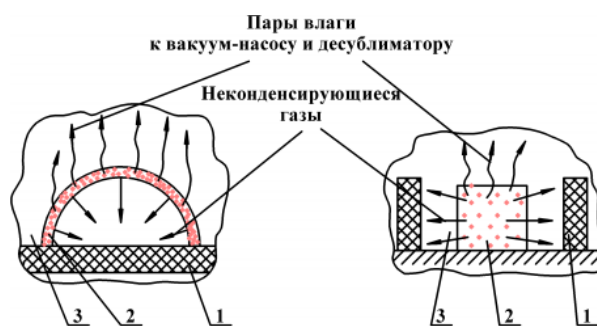


Рис. 12. Конденсатор-вымораживатель с возвратно-поступательным движением носителя: 1 – корпус, 2 – диски, 3 – испаритель, 4 – хладоноситель, 5 – общий шток, 6 – кронштейны



**Рисунок 13 - Способ сушки термочувствительных продуктов с использованием газопоглощающих материалов:
1 – геттер, 2 – замороженный продукт, 3 – камера вакуумная**

В развитие данной тематики в работах Воробьева Д.В. [13] и его коллег [8,21,26] для повышения эффективности процесса вакуум-сублимационного обезвоживания и снижения его энергоемкости, предлагается использовать термоэлектрические элементы, преимуществами которых являются экологическая чистота, отсутствие промежуточных газообразных и жидких хладагентов, независимость от ориентации в пространстве, бесшумность, широкие возможности миниатюризации, переход из режима охлаждения в режим нагревания и обратно за счет простого реверсирования тока.

В работе [8] проведены исследования процесса вакуум-сублимационного обезвоживания с использованием термоэлектрических модулей. Научно подтверждено, что термоэлектрический модуль, работающий на эффекте Пельтье (рисунок 14), способствует увеличению холодопроизводительности за счет использования принципа теплового насоса. Проведены эксперименты по применению термоэлектрических модулей в установках сублимационной сушки.

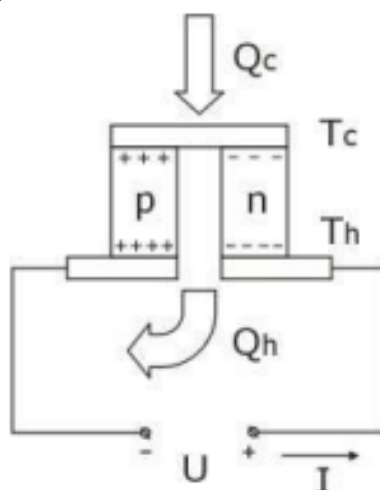


Рис. 14. Схема термоэлектрического модуля

Основными элементами термоэлектрических устройств являются термоэлектрический модуль, работающий на эффекте Пельтье, и теплообменник, способствующий увеличению холодопроизводительности счет представленных на рисунке выше конструктивных решений отвода тепла. Элемент Пельтье работает как тепловой насос, так как при пропускании тока через ветви (спая двух металлов) тепловая энергия перетекает с одной пластины на другую, что приводит к появлению холодной и горячей сторон. При изменении направления тока изменяется на противоположные холодные и горячие стороны. Принципиальным отличием используемых авторами термоэлектрических модулей от традиционных ячеек Пельтье явилось то, что керамическая подложка заменена металлической, что позволило существенно поднять холодопроизводительность и сократить время выхода на требуемый режим.

Недостатком термоэлектрических модулей относится их низкая холодопроизводительность, поэтому для обеспечения нормального процесса сушки необходимо, по мнению авторов, устанавливать $8 \div 10$ термоэлементов в каждой секции.

Воробьевым Д.В. проведен анализ энергетической эффективности применения термоэлектрических модулей в сублимационной сушилке. Разработана методика инженерного расчета процесса вакуум - сублимационного обезвоживания инулина с использованием термоэлектрических модулей. Определены оптимальные режимы работы термоэлектрических модулей в сушилке. Напряжение питания 24 В, сила тока $1,5 \div 2$ А, разница температур на спаях $60 \div 65$ °С. Предложены конструкции устройств, реализующие научные

подходы автора (рисунок 15) Эксперименты позволили сделать вывод, что в результате внедрения разработанной конструкции удельные энергозатраты снизятся на 25.30%, удельная производительность повысится на 10. 15%.

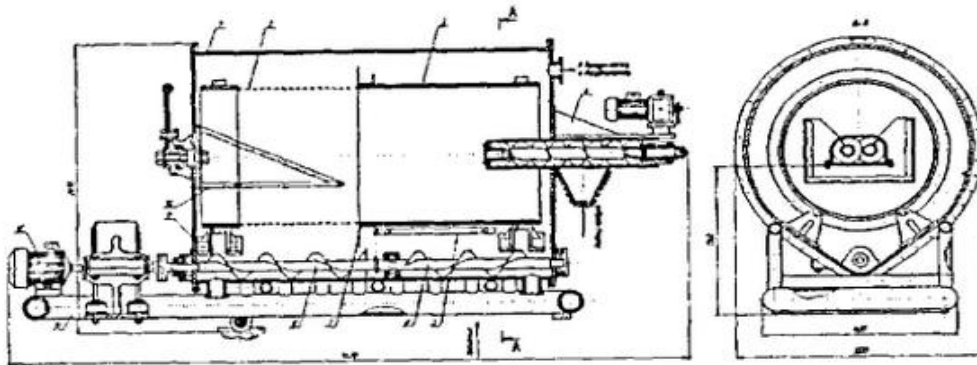


Рис. 15. - Вакуум-сублимационная сушилка непрерывного действия с использованием термоэлектрических элементов, предложенная Воробьевым Д.В: 1 - корпус; 2 - вращающийся барабан; 3 - термоэлектрические элементы; 4 - устройство для ввода продукта; 5 - нож; 6 - разгрузочный шнек; для выгрузка льда; 7 - заслонка; 8 - разгрузочный шнек для сухого продукта; 9 - опорные ролики; 10 - батарея ИК-нагревателей; 11 - шлюзовой затвор; 12 – привод

Жидкий продукт замораживается и измельчается в устройстве ввода 4 и попадает в барабан 2, вращающийся внутри корпуса 1 на опорных роликах 9. Продукт интенсивно перемешивается, измельчается и равномерно сушится за счет тепла термоэлектрических модулей 3 и инфракрасного нагрева 10. При прохождении по сплошному участку барабана 2, выполненного из термоэлектрических модулей 3, происходит частичная сублимация влаги из мелкодисперсной фракции, после чего она удаляется через перфорированный участок за пределы барабана 2. Время прохождения продукта по сплошному участку регулируется изменением угла наклона вращающегося барабана к горизонту всей сушилки. Оставшийся продукт досушивается в перфорированной части барабана 2, где высохший слой продукта отделяется от замороженных гранул за счет трения их между собой и о перфорацию барабана 2 и, просыпаясь через ячейки, удаляется разгрузочным шнеком 8, который вращается с помощью привода 12. Выгрузка сухого продукта из корпуса 1 осуществляется с помощью шлюзового затвора 11. Лед, образующийся на внешней стороне барабана, срезается при помощи ножа 5и отводится из корпуса 1 при помощи разгрузочного шнека 6.

Для обеспечения высоких качественных показателей высушиваемого продукта автором предложены рациональные режимы проведения процесса: размер гранул 2,5÷3,5 мм, плотность теплового потока 1,4÷1,6 кВт/м², степень заполнения барабана 12÷15 %.

Активно развивается направление вакуумной сушки при давлениях выше давления тройной точки воды [1-5,10,11,17,18,31,38,39,42,44]. Данная технология менее энергозатратна, чем классическая сублимационная сушка, но качество продукта значительно ниже [39]. Тем не менее вакуумное испарение с точки зрения уровня качества в зависимости от требований целесообразно применять для ряда продуктов. Примером работы, в данном направлении, служит работа [16], посвященная исследованиям вакуум-инфракрасной сушки мяса птицы.

Еще одним научным подходом является использование при вакуумной сублимационной сушке эффекта Ранка- самопроизвольного температурного разделения воздушного вихря на холодный и горячий потоки [15].

Принцип работы заключается в следующем: сжатый газ через тангенциальное сопло подается в улитку, где устанавливается интенсивное круговое течение. При этом возникает неравномерное температурное поле. Слои газа, находящиеся вблизи оси, оказываются более холодными, чем входящий газ, а периферийные слои закрученного потока нагреваются. Часть газа в виде холодного потока отводится через диафрагму, специальную насадку и щелевой диффузор, а другая часть в виде нагретого потока - через насадку и лопаточный диффузор с сеткой.

Применение данного эффекта, по мнению авторов, в процессе вакуум- сублимационной сушки, дает возможность эффективно использовать энергию на получение холода и тепла, снизить энергозатраты, по сравнению с традиционным способом сублимации, на 30%.

В обзоре представлена лишь малая часть разноплановых научных исследований, проводимых учеными всего мира в области вакуумного обезвоживания с целью повышения интенсивности процесса и повышения качества готового продукта.

Выводы:

1. Наибольшее внимание уделяется вопросам интенсификации подвода теплоты к фронту фазового перехода. Для этого используются СВЧ-поля, ультразвук, частичное удаление высушенного слоя, инфракрасный энергоподвод. Кроме этого, предлагаются различные варианты сочетания этих источников подвода энергии, в том числе с традиционным наиболее широко применяемым кондуктивным способом энергоподвода.

2. Большое внимание уделяется вопросам неравномерности высушивания объектов в условиях промышленного производства. Первоочередное внимание этой проблеме уделяется в технологиях высушивания фармацевтических препаратов, которые находятся во флаконах, ампулах или других емкостях.

3. Предлагаются новые технические решения отвода водяных паров из объекта сушки и их десублимации на охлаждаемых поверхностях. Инженерные решения лежат в сфере изменения поверхностей десублиматора, различных вариантов удаления льда с охлаждаемых поверхностей, как механическим путем, так и с использованием низкотемпературных жидкостей для предотвращения формирования слоев льда, использование систем откачки газовой среды вообще без применения традиционных систем десублимации.

4. Повышение энергоэффективности системы в целом за счет использования вторичных тепловых ресурсов – теплоты конденсации в холодильных машинах, теплоты конденсации вторичных паров, использование эффекта Пельтье для генерирования теплоты, использование эффекта Ранка для тепловода к объектам сушки от горячей части воздушного потока.

5. Обнадёживающие результаты получены как отечественными, так и зарубежными исследователями в вопросах энергосбережения путем использования в рамках одного цикла сочетаний сублимации, вакуумного испарения, испарения при атмосферном давлении. Эти подходы находят инженерное оформление как для объектов, расположенных неподвижно в сушильных камерах (кусковые продукты, продукты в замороженном слое), так и для жидких и пастообразных материалов, которые высушиваются при их вводе в сушильную камеру в виде распыленных частиц.

6. Использование математических методов и компьютерного моделирования для рассмотрения процесса сублимационной сушки как системы во взаимосвязи ее отдельных элементов и оптимизации режимных параметров.

7. Достижение энергосбережения за счет предварительного удаления влаги малоэнергосодержащими способами – ультрафильтрация, прессование и т.д. Проведение процесса сушки жидких и пастообразных материалов в режиме вспенивания на начальной стадии сушки

Список литературы (References)

1. *Алексанян И.Ю., Буйнов А.А., Рогов И.А., Агеенко И.С.* Обоснование выбора ИК-генераторов для сушки рыбных гидролизаторов во вспененном состоянии // Совершенствование оборудования для обработки объектов морского промысла. – Калининград: КТИРПиХ, 1988. – С. 21-31.
2. *Алексанян И.Ю., Давидюк В.В.* Способ получения цукатов методом вакуумной сушки // - Москва: АГТУ, 1994.- 1/94. - С. 150-152.
3. *Алексанян И.Ю., Давидюк В.В., Артемьева Н.Н.* Совершенствование метода генерирования пен и нанесения пищевых продуктов в обычном и вспененном состоянии на рабочую поверхность сушилок // Межд. научно - техн. конф.: Тез. докл. – К., 1999. – Ч.4. – С. 37.
4. *Алексанян И.Ю.* Термодинамика внутреннего массопереноса и физико-химические характеристики рыбных фаршей, томатной пасты, яблок и картофеля // Межд. научно - техн. конф., посвящ. 70-летию АГТУ: Тез. докл. – А., 2000.
5. *Алексанян И.Ю.* Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения. Автореферат дисс. докт. техн. наук, Астрахань, 2001 г.
6. *Антипов С.Т.* Исследование процесса вакуум-сублимационного обезвоживания пищевых продуктов при различных способах энергоподвода / С.Т. Антипов, А.А. Воронин, А.С. Кумицкий и др. // Вестник Международной академии холода. – СПб.-М. – 2007. – Вып. 2. – С. 44-47.
7. *Антипов С.Т.* Моделирование процессов вакуум-сублимационной сушки материалов с развитой поверхностью тепло- и массообмена и с различными источниками энергоподвода / С.Т. Антипов, А.И. Шашкин, С.В. Шахов и др. - Воронеж : ВГТА, 2011. - 168 с.
8. *Барыкин Р.А.* Разработка вакуум-сублимационных сушилок с использованием термоэлектрических модулей / Р.А. Барыкин, В.В. Пойманов, С.В. Шахов // Вестник ВГУИТ. - Воронеж. - 2014. - №1. - С. 47-50.
9. *Бокадаров С.А.* Исследование процесса вакуум-сублимационного обезвоживания экстракта левзеи сафлоровидной с использованием низкопотенциального источника энергии. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Воронеж, 2011.
10. *Буданцев Е.В.* Интенсификация обезвоживания жидких и пастообразных термолабильных пищевых продуктов в условиях последовательного сочетания процессов испарения в вакууме и сублимации в едином цикле. Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М., 2011.
11. *Буйнов А.А.* Научные основы процессов сушки жидких пищевых продуктов во вспененном состоянии: Автореф. д-ра техн. наук. – М., 1998. - 24 с.
12. *Булкин М.С.* Сублимационная сушка сырья биологического происхождения с учетом флуктуаций в промышленных технологиях. Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М., 2010.
13. *Воробьев Д.В.* Разработка способа вакуум-сублимационной сушки инсулина в установке с термоэлектрическими модулями. Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Воронеж, 2011.
14. *Гуйго Э.И., Журавская Н.К., Каухчевили Э.И.* Сублимационная сушка в пищевой промышленности. – М.: Пищевая промышленность, 1965. - 265 с.

15. Добромиров В.Е. Разработка способа вакуум-сублимационного обезвоживания с использованием эффекта Ранка / В.Е. Добромиров, С.А. Бокадаров // Сборник материалов 48-й отчетной научной конференции предприятия ВГТА за 2009 год. - Воронеж: ВГТА, 2010. - Ч.2. - С.32.
16. Иванов И.В. Исследование вакуум-инфракрасной сушки чипсов / И.В. Иванов, Г.В. Гуринович // Техника и технология пищевых продуктов. - Кемерово: КТИПП. - 2013. - №3. - С.22-26.
17. Иванченкова Т.А. Влияние режимов сушки на качественные характеристики белого мяса птицы / Е.И. Титов, Г.В. Семенов, Т.А. Иванченкова и др. // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. - №7. – С. 27-29.
18. Иванченкова Т.А. Разработка технологии продукта из ферментированного мяса птицы, обезвоженного путем вакуумного испарения и сублимационной сушки в едином цикле. Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М., 2013.
19. Касаткин В.В. Научное обоснование энергосберегающих электротехнологий и оборудования сублимационной сушки жидких термолабильных продуктов пищевого назначения. Автореф. дисс. докт. техн. наук. – СПб. - Пушкин, 2004.
20. Кретов И. Т. Моделирование процесса вакуум-сублимационной сушки пищевых продуктов в поле СВЧ / И.Т. Кретов., А.И. Шашкин, С.В. Шахов и др. // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. - 2003. - № 5-6. - С. 65-68.
21. Патент РФ 2183307 Вакуум-сублимационная сушилка / В.Н. Санин, С.Т. Антипов, В.В. Пойманов — Заявл. 17.07.2000, Оpubл. 10.06.2002, Бюл. № 16.
22. Патент РФ 2350861 Вакуум-сублимационная сушилка для вспененных продуктов и способ ее автоматического управления / С.Т. Антипов, В.Е. Добромиров, С.В. Шахов и др. — Заявл. 11.12.2007, Оpubл. 27.03.2009, Бюл. № 9.
23. Патент РФ 2358214 Устройство для распыления жидкого продукта в вакуум-сублимационной сушилке / С.Т. Антипов, В.Е. Игнатов, А.А. Воронин — Заявл. 19.11.2007, Оpubл. 10.06.2009, Бюл. № 16.
24. Патент РФ 2374580 Барабанная вакуумная сушилка термолабильных продуктов с двухстадийным индуктивным нагревом / С.Т. Антипов, С.В. Шахов, А.А. Жашков и др. — Заявл. 27.11.2008, Оpubл. 27.01.2009, Бюл. № 33.
25. Патент РФ 2375654. Установка вакуумной сублимационной сушки / С.А. Ермаков — Заявл. 23.06.2008, Оpubл. 10.12.2009, Бюл. № 34.
26. Патент РФ 2395768. Вакуум-сублимационная сушилка / С.Т. Антипов, В.В. Пойманов, Д.В. Воробьев — Заявл. 03.08.2009, Оpubл. 27.07.2010, Бюл. № 21.
27. Патент РФ 2416918. Способ вакуумной сублимационной сушки с конвективным подводом тепловой энергии и установка вакуумной сублимационной сушки / С.А. Ермаков — Заявл. 11.01.2010, опубл. 27.04.2011, Бюл. № 12.
28. Патент РФ 2445561. Установка для вакуумной сушки биологических материалов / Н.Э. Каухчешвили, А.Ю. Харитонов, Г.Д. Шабетник — Заявл. 08.07.2010, Оpubл. 20.03.2012, Бюл. № 8.
29. Патент РФ 2458300. Криогенная вакуум-сублимационная установка с комплексным использованием инертного газа / В.Е. Добромиров, С.В. Шахов, И.С. Моисеева и др. — Заявл. 01.04.2011, Оpubл. 10.08.2012, Бюл. № 22.
30. Патент РФ 2486419 Многосекционная вакуум-сублимационная сушилка поточно-циклического действия / С.Т. Антипов, Г.И. Мосолов, А.С. Шахов и др. — Заявл. 30.12.2011, Оpubл. 27.06.2013, Бюл. № 18.
31. Патент РФ 2490914. Способ вакуумного обезвоживания белого мяса птицы в условиях сочетания процессов вакуумного испарения и сублимации в едином цикле / Е.И. Титов, Г.В. Семенов, Е.В. Буданцев и др. — Заявл. 27.12.2011, опубл. 27.08.2013, Бюл. № 24.
32. Патент на полезную модель РФ 99859, Вакуум-сублимационная сушилка непрерывного действия / С.Т. Антипов, А.Н. Рязанов, В.В. Пойманов и др. — Заявл. 15.02.2010, Оpubл. 27.11.2010.
33. Поспелова И.Г. Разработка технологии сублимационной сушки фруктов и овощей с использованием СВЧ- и УЗ-излучателей. Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Ижевск, 2009.
34. Поспелова, И.Г. Сублимационная сушка с комбинированным энергоподводом / И.Г. Поспелова, Я.Н. Захарова, Ф.В. Габасова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009.- №6. – С.30-32.
35. Рогов. И.А. Сверхвысокочастотный и инфракрасный и нагрев пищевых продуктов / И. А. Рогов, С. В. Некрутман. - М.: Пищевая промышленность, 1976. - 213 с.
36. Рогов. И.А. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов / И. А. Рогов, С. В. Некрутман, Г. В. Лысов. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. - 199 с.
37. Рушиц А.А. Применение СВЧ-нагрева в пищевой промышленности и общественном питании / А.А. Рушиц, Е.И. Щербакова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. - Челябинск: ЮУрГУ. - 2014. - №1. - Том 2. - С.9-13.
38. Семенов Г.В. Вакуумная сублимационная сушка. - М.: ДеЛи плюс, 2013. - 264 с.
39. Семенов Г.В. Качество и энергозатраты в процессах вакуумного обезвоживания термолабильных материалов / Семенов Г.В., Буданцев Е.В., Булкин М.С. // Известия ВУЗов. Пищевая технология. Краснодар. – КубГТУ. – № 1. – 2011.– С. 65-67.
40. Семенов Г.В., Буданцев Е.В., Меламед Л.Э. и др. Математическое моделирование и экспериментальное исследование совмещенных циклов вакуумной сушки термолабильных материалов // Вестник Международной академии холода. 2011. № 4. С. 5-11.
41. Семенов Г.В. Современное состояние и перспективы развития энергосберегающих технологий и оборудования / Семенов Г.В., Орешина М.Н. // Холодильная техника. – 2008. - №11. – С.38-40.

42. Семенов Г.В. Тепломассообмен в процессах низкотемпературного вакуумного обезвоживания термолабильных материалов и его аппаратурное оформление. Автореф. дисс. д-ра техн. наук. – М., 2003.
43. Семенов Г.В., Булкин М.С., Меламед Л.Э. и др. Тепломассообмен в промышленных процессах вакуумного сублимационного обезвоживания с учетом условий контактирования // Вестник Международной академии холода. 2010. № 2. С. 22-33.
44. Семенов Г.В., Шабетник Г.Д. Интенсификация процессов вакуумной сушки жидких и пастообразных материалов / Семенов Г.В., Шабетник Г.Д. / Известия ВУЗов «Пищевая технология». – 2002.- № 4. - С.39-43
45. Хуссейн Мохамед Маграбие Слама. Совершенствование процесса замораживания в технологии вакуум-сублимационной сушки пищевых продуктов с использованием низкотемпературного воздуха от турбохолодильной машины. Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М., 2011.
46. Шахов С.В. Научное обеспечение развития системы процессов интенсивного обезвоживания пищевых сред с применением вакуум-сублимационной сушки. Автореф. дисс. д-ра техн. наук. – Воронеж, 2011.
47. Шахов С.В., Мосолов Г.И., Барыкин Р.А. Разработка вакуум-сублимационной сушилки для обезвоживания жидких продуктов // Вестник Международной академии холода. 2014. № 3. С. 58-60.
48. Barresi A.A. Monitoring of the primary drying of a lyophilization process in vials / A. A. Barresi, R. Pisano, D. Fissore et al. // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 48, no. 1, pp. 408–423, 2009.
49. Dern C. Considerations when specifying ultimate freeze drying vacuum / Charles D. Dern // The Information Source for the Pharmaceutical Manufacturing Industry Pharmaceutical Online [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pharmaceuticalonline.com>, для доступа к информ. ресурсам требуется авторизация (17.11.2014). - January 27, 2006.
50. Ekenlebie E. Short cycle times for cost-efficient processing in lyophilized formulations / Edmond Ekenlebie, Andrew Ingham // *American Pharmaceutical Review*. September 01. 2011.
51. Fissore D. A model-based framework to optimize pharmaceuticals freeze drying / Fissore D, Pisano R, Barresi A.A // *Drying Technology* 01/2012. - 9(30). - pp. 946-958.
52. Gieseler H. PAT for freeze drying: cycle optimization in the laboratory / Henning Gieseler // The Information Source for the Pharmaceutical Manufacturing Industry Pharmaceutical Online [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pharmaceuticalonline.com>, для доступа к информ. ресурсам требуется авторизация (17.11.2014). - SP Industries LyoLearn Webinar Series, February 10, 2011.
53. Gieseler H. Process analytical technology for freeze-drying: cycle optimization in the laboratory. *European Pharmaceutical Review*: Issue 1, 2007.
54. Hong-Ping Cheng. Analysis of heat transfer mechanism for shelf vacuum freeze-drying equipment / Hong-Ping Cheng, Shian-Min Tsai, Chin-Chi Cheng // *Advances in Materials Science and Engineering* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/515180>, свободный (17.11.2014)., Volume 2014 (2014), Article ID 515180, 7 pages.
55. Li Xiao-bin. Intelligent predicting control of vacuum freeze-drying temperature / Li Xiao-bin, Wang Hai-bo // *Computer Engineering and Applications*. - 2010. - 46(30). - P. 241-244.
56. Millrock Technology. End of primary drying methods. The Information Source for the Pharmaceutical Manufacturing Industry Pharmaceutical Online [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pharmaceuticalonline.com>, для доступа к информ. ресурсам требуется авторизация (17.11.2014). - February 15, 2010.
57. Patel S.M. Practical considerations for freeze-drying process design, development and scale-up / Sajal Manubhai Patel, Brian Lobo, Ambarish Shah // *American Pharmaceutical Review* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.americanpharmaceuticalreview.com>, свободный (17.11.2014). - October 25, 2013.
58. Petitti M. CFD modelling of condensers for freeze-drying processes / Miriam Petitti, Antonello Barresi, Daniele Marchisio // *Sādhanā*, Vol. 38, Part 6, December 2013, pp. 1219–1239.
59. Pisano R. A New method based on the regression of step response data for monitoring a freeze-drying cycle / Roberto Pisano, Davide Fissore, Antonello A. Barresi // *Journal of Pharmaceutical Sciences* 04/2014.
60. Pisano R. Quality by design: scale-up of freeze-drying cycles in pharmaceutical industry / Roberto Pisano, Davide Fissore, Antonello A Barresi et al. // *AAPS PharmSciTech* 07/2013.
61. Püschner GmbH & Co KG. Mikrowellen gefriertrocknung von gemüse und früchten // *bionity.com* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bionity.com/>, свободный (17.11.2014).
62. Püschner P. Microwave vacuum drying of fruits & vegetables / Peter Püschner, Louise Loh Siok Hoon // *The 5th Asia-Pacific Drying Conference (ADC07) August 13-15, 2007, Hong Kong*.
63. Rambhatla S. Heat and mass transfer scale-up issues during freeze-drying, I: atypical radiation and the edge vial effect / Shailaja Rambhatla, Michael J. Pikal // *AAPS PharmSciTech*, 2003. - 4(2). - Article 14.
64. Rey. L. Lyophysical Aspects of Freeze-Drying / Rey. L. , Bastien M. // «Freeze-Drying of Foods», Washington, 1962, p.25-42.
65. Schneid S. PAT in freeze drying: monitoring of product persistence using non-invasive NIR-spectroscopic TDLAS measurements / S. Schneid, H. Gieseler // *Proc. 7th World Meeting on Pharmaceuticals, Biopharmaceuticals and Pharmaceutical Technology*, Valetta, Malta, March 8-11, 2010.
66. Schneid S. Rational approaches and transfer strategies for the scale-up of freeze-drying cycles / S. Schneid, H. Gieseler // *Chimica Oggi/Chemistry Today*, 2011. - 29(1). - pp. 10-13.
67. Schubert H. The Microwave processing of foods / H. Schubert, M Regier // Woodhead Publishing, 2005. - 360 p.