

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ В ВАКУУМЕ

А.А. Галузин

galuzin1994@mail.ru

SPIN-код: 4461-7121

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Статья посвящена технологии и оборудованию для низкотемпературного обезвоживания в вакууме. На сегодняшний день экологическая ситуация во всем мире требует более пристального внимания к процессам переработки и утилизации отходов, которые зачастую просто сбрасываются в окружающее пространство. Технология низкотемпературного обезвоживания в вакууме (НОВ) — это экологически чистый и высокотехнологический способ переработки пищевых отходов, который позволяет проводить качественное обезвоживание продукта с сохранением первоначальной структуры и процентного состава биологически полезных компонентов. Авторами статьи проведен анализ и выбор оптимальных режимов обезвоживания, в ходе которого определен диапазон температур для наиболее экономичного и производительного режима процесса сушки. Описана автоматизированная установка НОВ, которая предназначена для демонстрации возможностей технологии НОВ и отработки режимов обезвоживания различных веществ, имеющих первоначальную влажность от 65 до 98 %. Данную установку можно использовать как для переработки отходов, так и для изготовления пищевой продукции. Результаты работы показали, что технология НОВ является эффективной, высокотехнологичной и экологически чистой и имеет очень широкую область применения: от переработки отходов различных видов производств до изготовления продуктов питания.

Ключевые слова

Обезвоживание, низкотемпературное обезвоживание, вакуумная сушка, технология НОВ, система автоматического управления, переработка отходов, установка НОВ, температурный режим

Поступила в редакцию 02.07.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. На сегодняшний день трудно переоценить важность и роль экологии в жизни как целого общества, так и каждого отдельного человека. В свою очередь, состояние планеты зависит как от коммерческих компаний, вырабатывающих тонны отходов каждый год, так и от отдельного индивида, пользующегося благами цивилизации [1]. Следует обратить внимание, что такие экологические проблемы, как утилизация отходов и выбор места их захоронения были

актуальны во все времена, но именно сегодня эти вопросы особо актуальны, так как отходы подвергаются гниению, накапливаются в огромных количествах, негативно влияя на окружающую среду. Таким образом, загрязнения очень пагубно влияют на экологию нашей планеты, это связано, прежде всего, с жизнедеятельностью человека и животных. Кроме того, в настоящее время актуальна проблема утилизации отходов при создании автономных систем жизнеобеспечения человека (в космическом пространстве, подводных лодках и пр.).

Одним из способов решения перечисленных выше проблем являются процессы обезвоживания веществ.

Процессы обезвоживания органических веществ большой первоначальной влажности (до 99 %) характерны для многих отраслей. Особенно остро стоит проблема обезвоживания (до стандартной влажности 14 %) для производств с годовыми объемами продукции в миллионы тонн (например, пищевая, комбикормовая промышленности) и при переработке различных отходов, шламов сточных вод [2–5].

В настоящей работе рассмотрена технология низкотемпературного обезвоживания в вакууме (НОВ), позволяющая проводить качественное обезвоживание продукта с сохранением первоначальной структуры и процентного состава биологически полезных компонентов.

Метод НОВ — безотходная энергосберегающая технология, в процессе которой происходит фракционирование жидкого исходного продукта на три составляющие: сухой остаток, чистую воду, которую можно использовать, и незначительный экологически безопасный выхлоп.

Таким образом, процесс низкотемпературного обезвоживания материалов, насыщенных водой, отличается от обычной сушки, при которой изменяются структурно-механические, технологические и биохимические свойства материала. При использовании рассматриваемого процесса таких изменений не происходит и обезвоженный материал отличается от первоначального только процентным содержанием воды, сохраняя свою структуру и процентный состав биологически полезных компонентов. Кроме того, в процессе НОВ происходит обеззараживание продуктов от различных бактерий [5].

Технология низкотемпературного обезвоживания в вакууме. Технология НОВ — это процесс разделения исходного продукта большой первоначальной влажности на три составляющие: сухой продукт, водный конденсат и газообразный выхлоп, при этом нагрев обрабатываемого продукта осуществляется в вакууме в температурном диапазоне, нижний предел которого ограничивается температурой испарения воды при рабочем давлении в технологическом объеме, а верхний — условиями, обеспечивающими отсутствие необратимых потерь полезных свойств исходного вещества и возможностью уничтожения живых клеток организмов и растений, присутствующих в обрабатываемом веществе.

Низкотемпературное обезвоживание в вакууме — безотходная энергосберегающая и экологически чистая технология, которая сочетает в себе низкую температуру обработки исходного продукта влажностью до 99 % в диапазоне

20...80 °С и вакуум в герметичном технологическом объеме (без контакта с окружающей средой) [6–8]. Выходной продукт включает: сухой остаток (влажностью до 10 %), чистую воду (конденсат) и незначительный экологически безопасный выхлоп (рис. 2).

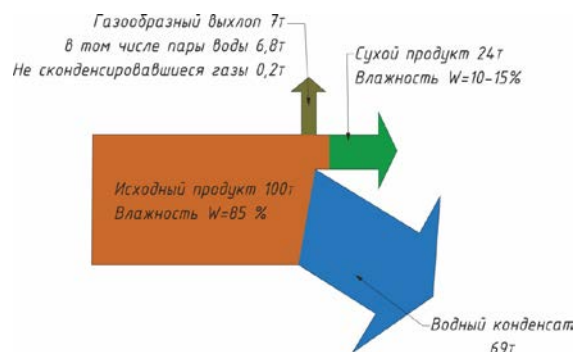


Рис. 2. Баланс исходного и выходного продуктов

Благодаря своей универсальности технология НОВ может быть использована для решения задач экологического бизнеса в следующих областях:

- переработка птичьего помета в высокоэффективное органическое удобрение, аналогичное естественному гуано, утилизация и переработка свиного помета;
- экологически чистая и безотходная переработка продуктов человеческой жизнедеятельности;
- получение экологически чистого органического удобрения из отходов сахарного производства (дефеката);
- переработка молочной сыворотки в импортозамещающий белково-витаминный продукт функционального питания людей;
- производство микробиологического белка из отходов спиртового производства;
- производство широкой гаммы порошков влажностью 8...14 % и паст влажностью 60...70 % различных овощей, фруктов, томатов, моркови, грибов, яблок, чеснока, пивной дробины и других продуктов с начальной влажностью до 98 %, использующихся при производстве соков и в качестве кормовых и пищевых добавок.

Обобщая все сказанное, функциональную схему технологии низкотемпературного обезвоживания в вакууме можно представить в виде рис. 3.

Анализ и выбор оптимальных режимов обезвоживания. Характерная особенность процесса обезвоживания — большие потоки паров воды (до 10^7 л/с), которые необходимо эффективно удалять из рабочего пространства технологического объема установки.

В физической основе процесса лежит перенос насыщенных паров воды из зоны с большим давлением и концентрацией в зону с меньшей концентрацией и давлением. Этими зонами будут область над поверхностью обезвоживаемого продукта и область, где происходят конденсация и сбор выделившегося из про-

дукта массопотока паров воды. Для наибольшей эффективности процесса обезвоживания необходимо, чтобы этот перепад давлений и, следовательно, концентрации паров воды был как можно больше, поскольку при этом скорость и объем массопотока возрастут.

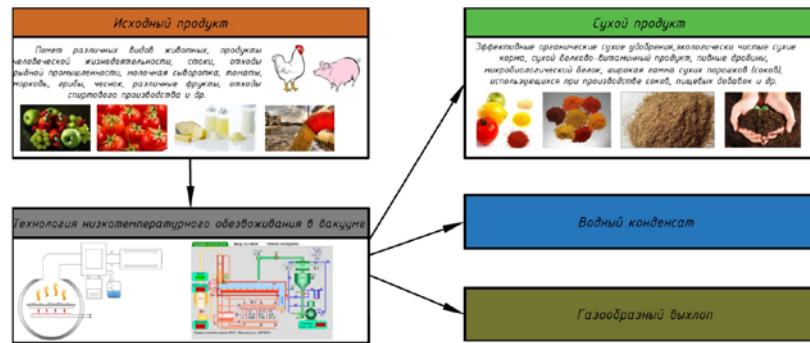


Рис. 3. Функциональная схема технологического процесса НОВ

Важнейшим параметром процесса является тепловой поток, подводимый к обезвоживаемому продукту. Поскольку в процессе сушки необходимо испарять огромное количество влаги, энергозатраты на подогрев продукта достигают десятков киловатт в час.

Уменьшить энергозатраты на нагрев продукта можно только за счет уменьшения разности температуры насыщенных паров и начальной температуры обрабатываемого материала — по сути, за счет уменьшения температуры насыщенных паров. Поэтому целесообразно проводить сушку при как можно меньших значениях температуры. Однако чем меньше температура испарения, тем труднее обеспечить перепад температур между нагревателем и конденсатором. На конденсаторе сложно обеспечить температуру ниже 10...15°C.

Таким образом, главной целью выбора наиболее экономичного и производительного режима процесса сушки является определение диапазона, в котором, во-первых, минимальны суммарные затраты мощности на нагрев, испарение, откачку и конденсацию паров, во-вторых, минимальному перепаду температуры соответствует максимальный перепад давлений насыщенных паров воды [10].

Для определения зависимости давления насыщенных паров воды от температуры и определения нужного нам диапазона воспользуемся уравнением состояния реальных газов Ван-дер-Ваальса для одного моля газа по формуле

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2} \right) (V_m - b) = RT, \quad (*)$$

где p — давление насыщенных паров воды, Па; a — постоянная Ван-дер-Ваальса, характеризующая силы межмолекулярного взаимодействия; V_m — молярный объем, м³; b — объем, занимаемый самими молекулами, м³; R — удель-

ная (индивидуальная) газовая постоянная, Дж/(кмоль · К); T — термодинамическая температура, К.

Числовые значения постоянных a , b и R рассчитывают по критическим параметрам вещества (воды): критической температуре T_k , критическому давлению p_k и критическому удельному объему V_k , которые определяются экспериментально (по справочным данным) согласно следующим формулам:

$$a = 3V_k^2 p_k; \quad b = \frac{V_k}{3}; \quad R = \frac{8p_k V_k}{3T_k},$$

Подставив числовые значения переменных и констант для рассматриваемого газа (пары воды) в формулу (*), получим массив данных и изобразим его в виде графика (рис. 4).

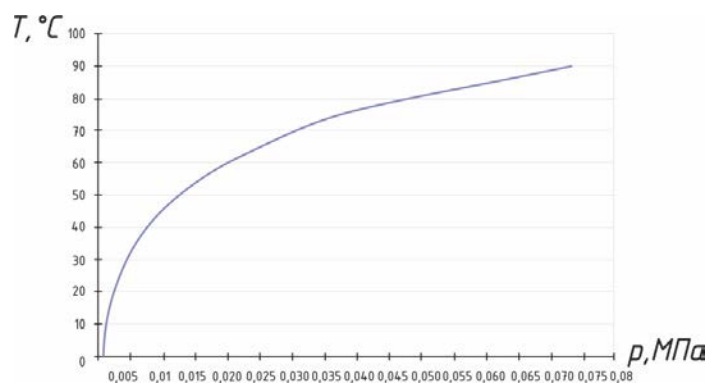


Рис. 4. Зависимость давления насыщенных паров воды от температуры

Для определения интересующего нас диапазона (в котором минимальному перепаду температуры соответствует максимальный перепад давлений) рассчитаем приращения давления с увеличением температуры шагом 5 °C (рис. 5).

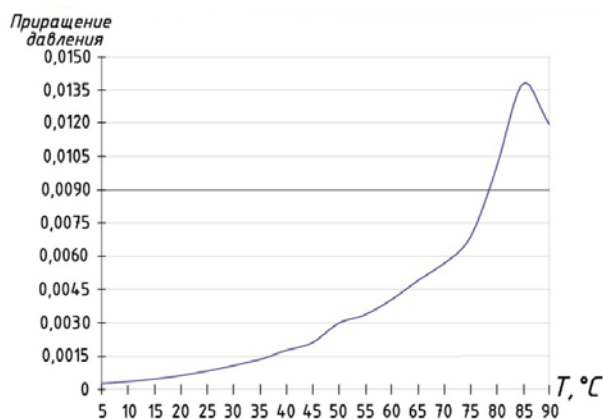


Рис. 5. Зависимость приращения давления от температуры

Согласно рис. 5, наибольшие приращения давления происходят в диапазоне температур 55...85 °С (особенно в диапазоне 70...85 °С). Таким образом, для достижения наибольшей производительности и экономичности, процесс НОВ необходимо осуществлять при температуре 55...85 °С.

На основе полученных данных проанализируем варианты обезвоживания в различных температурных диапазонах по следующим критериям (см. таблицу):

– экономичность режима — примерные энергозатраты на испарение воды при данной температуре;

– качество обезвоживаемого продукта — исходя из того, что «полезность» продукта уменьшается при проведении обезвоживания при температурах более 70...75 °С.

Таблица 1

Анализ температурного режима сушки

№	Температура насыщенных паров воды, °С	Давление насыщенных паров воды, МПа	Экономичность режима сушки	Качество обезвоженного продукта
1	0–55	0,00061–0,01587	–	++
2	55–70	0,01587–0,03052	+	++
3	70–85	0,03052–0,61149	++	+

В результате проведенного анализа можно отметить следующее:

– при высоких требованиях к качеству и пищевой ценности готового продукта обезвоживание целесообразно проводить при температуре 55...70°С;

– если не требуется получения продукта высокого качества (при сушке непищевых продуктов), то обезвоживание целесообразно проводить в более экономичном диапазоне, при температуре 70...85°С.

Установка низкотемпературного обезвоживания в вакууме. В основе конструкция и принципа действия установки лежит рассмотренная технология низкотемпературного обезвоживания в вакууме.

Установка низкотемпературного обезвоживания в вакууме предназначена для демонстрации возможностей технологии НОВ и для отработки режимов обезвоживания различных веществ первоначальной влажностью 98...65 % [2, 9].

В установке предусмотрен нагрев обрабатываемого продукта с помощью горячей воды, получаемой от внешнего источника.

Система транспортировки продукта по теплообменнику внутри технологической камеры предусматривает различные способы его перемещения и перемешивания. Продукт может ворошиться на месте и перемещаться на шаг транспортирования. Интервалы времени между тактами локальных перемещений при ворошении и число тактов ворошения между перемещениями на шаг транспортирования могут определяться программно и изменяться в процессе работы установки.

Функционально установка НОВ состоит из системы подачи исходного продукта *SPIN*, камеры технологической *КТ* с системой транспортирования, систе-

мы нагрева теплообменника *HS*, сборника готового продукта *Spout*, вакуумной системы *VS*, системы снабжения холодной водой *CW*, пневмосистемы *PSYS*, системы электропитания и управления *SPU*.

Комплексная принципиальная схема установки НОВ представлена на рис. 6.

Продукт из приемного бункера *Bp* насосом *NZ* подается в дозатор *Dzt*, из которого с помощью загрузочного шлюза, приводимого в действие пневмоцилиндром дозатора *PZD*, попадает в камеру технологическую *KT*.

В камере *KT* размещен теплообменник из полого алюминиевого профиля. Над ним расположен скребковый транспортер, приводимый в действие пневмоцилиндром *PZ1*. Скребок способен передвигать продукт на шаг транспортирования, либо ворошить его на месте перемещениями, меньшими, чем шаг транспортирования. При этом продукт нагревается от алюминиевого профиля, во внутренней полости которого циркулирует горячая вода, либо отработанный пар из турбогенератора.

Нагрев продукта от теплообменника и откачка камеры технологической вакуумным насосом *FVN* приводят к интенсивному испарению содержащейся в продукте влаги. Дойдя до конца теплообменника, продукт выгружается в приемную емкость, которая при ее заполнении снимается и заменяется пустой, либо оперативно выгружается.

Программное обеспечение установкой НОВ работает в составе управляющей сети, состоящей из компьютера рабочего места оператора (КРМО) и контроллера PLC, объединенных сетью на основе канала RS-485 (допускается замена на RS-232) или Ethernet.

Управление установкой при выходе на стационарный режим осуществляется с помощью интерфейса оператора (рис. 7). На мониторе отображается состояние ее подсистем и элементов. Оператор запускает процессы откачки, нагрева, подачи и транспортирования продукта, вручную по подсказке с монитора коммутируя клапана и включая насосы. Он имеет возможность задавать уставки на основные параметры реализуемых процессов, активизировать их и далее они выполняются автоматически.

В процессе работы установки фиксируются в памяти системы управления и сохраняются на жестком диске файлы отчета о работе, предназначенные для анализа режимов ее работы с целью выбора оптимальных режимов функционирования. Ручной режим управления позволяет реализовывать нетиповые режимы и устранять нештатные ситуации.

Автоматизированная установка НОВ дает возможность проводить эксперименты по обезвоживанию различных продуктов и веществ. Кроме того, с целью повышения эффективности описанной установки, планируется ряд экспериментов по выявлению закономерностей тепломассообмена при низкотемпературном обезвоживании и повышению скорости конденсации водяных паров за счет использования электрического поля.

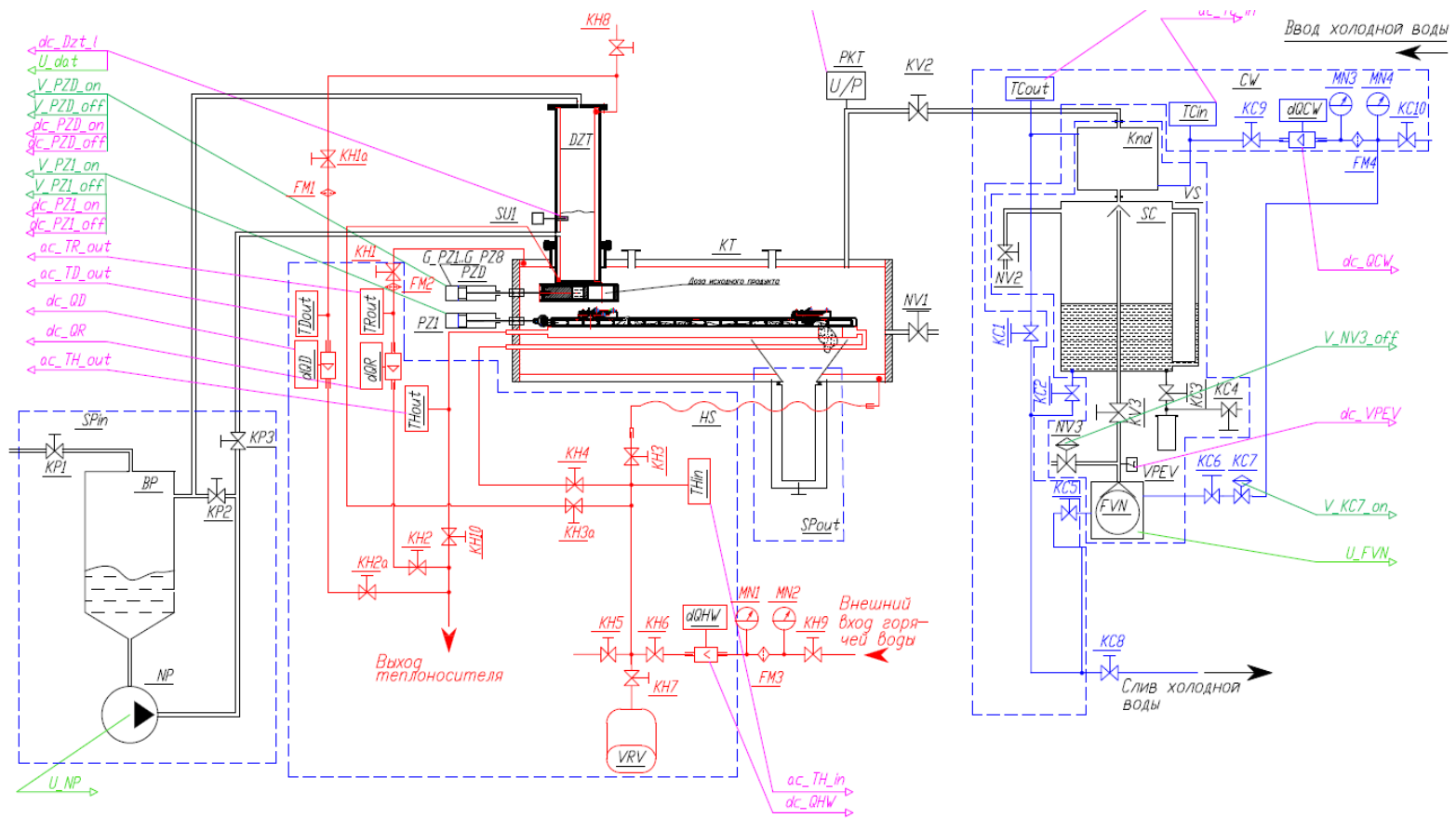


Рис. 6. Комплексная принципиальная схема установки НОВ

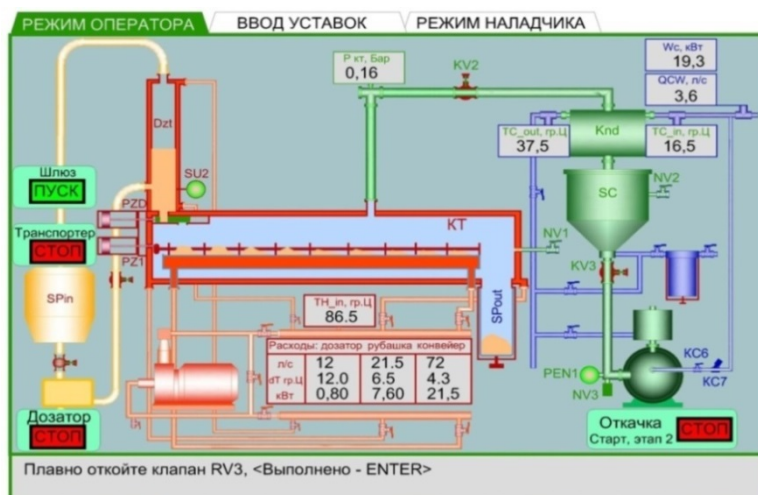


Рис. 7.Интерфейс оператора

Внешний вид автоматизированной установки НОВ представлен на рис. 8.

Заключение. Для отработки технологии низкотемпературного обезвоживания в вакууме на установке НОВ неоднократно проводили ряд экспериментов, где в качестве исходного продукта были использованы томаты. Обезвоживание происходило при температуре 60...65 С и вакууме с давлением $-0,09$ МПа. В результате проведенного эксперимента был получен сухой продукт — томатный порошок (чистый, сухой, без запаха), а также водный конденсат и небольшой газообразный выхлоп. Полученный сухой порошок можно использовать для последующего изготовления томатного сока или томатной пасты. Не менее успешно были проведены опыты, где в качестве исходных продуктов использовались яблоки и пивная дробина. Проведенные эксперименты доказали эффективность технологии низкотемпературного обезвоживания в вакууме и правильность работы установки НОВ.



Рис. 8.Внешний вид установки НОВ

Таким образом, рассмотренная технология низкотемпературного обезвоживания в вакууме позволяет осуществить переработку отходов сельскохозяйственных производств в ценные продукты с сохранением витаминов, аминокислот и других полезных составляющих исходного материала. Особенность установки НОВ сохранять нативные свойства исходного вещества расширяет ее возможности и позволяет использовать ее для переработки фруктов, овощей, дикоросов, грибов.

Литература

- [1] Какова роль экологии в жизни современного человека? *litgt.rgups.ru: веб-сайт*. URL: <http://litgt.rgups.ru/wp-content/uploads/2018/06/1-Роль-экологии-в-обществе.pdf> (дата обращения: 12.02.2018).
- [2] Веселова Е.Л. Определение закономерностей обезвоживания в вакууме и разработка структуры автоматизированного оборудования. Дисс. ... канд. тех. наук. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998.
- [3] Sagar V.R., Kumar P.S. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *J. Food Sci. Technol.*, 2010, vol. 47, no. 1, pp. 15–26. DOI: 10.1007/s13197-010-0010-8 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs13197-010-0010-8>
- [4] Nadi F., Tzempelikos D. Vacuum drying of apples (cv. Golden Delicious): drying characteristics, thermodynamic properties, and mass transfer parameters. *Heat Mass Transfer*, 2018, vol. 54, no. 7, pp. 1853–1866. DOI: 10.1007/s00231-018-2279-5 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-018-2279-5>
- [5] Веселова Е.Л. Обезвоживание в вакууме. Физика технологии. Применение. *Справочник. Инженерный журнал*, 1998, № 1, с. 18–20.
- [6] Ковалев Л.К. Низкотемпературное обезвоживание органических веществ большой влажности в вакууме. *Справочник. Инженерный журнал*, 1997, № 2, с. 47–48.
- [7] Ковалев Л.К., Рябов В.Т., Ковалева Н.Л. и др. Синтез структуры систем управления технологическим оборудованием. *Справочник. Инженерный журнал*, 2002, № 3, с. 10–16.
- [8] Ковалева Н.Л. Разработка и исследование процесса и оборудования низкотемпературного испарения влажосодержащих веществ в вакууме. Дисс. ... канд. тех. наук. М., МИЭМ, 2004.
- [9] Костин А.М., Марков В.П., Шваб В.В. и др. Устройство для низкотемпературного обезвоживания и сушки материалов в вакууме. Патент 2379604 РФ. Заявл. 17.12.2008., опубл. 20.01.2010.

Галузин Андрей Алексеевич — аспирант кафедры «Электронные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Рябов Владимир Тимофеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Галузин А.А. Исследование процесса низкотемпературного обезвоживания в вакууме. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 9(38). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-9-525>

RESEARCH OF THE PROCESS OF LOW-TEMPERATURE DEHYDRATION IN VACUUM

A.A. Galuzin

galuzin1994@mail.ru
SPIN-code: 4461-7121

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

This article discusses the technology and equipment for low-temperature dehydration in vacuum. Today, the environmental situation around the world requires more attention to the processes of processing and disposal of waste, which are often simply dumped into the surrounding space. The technology of low-temperature dehydration in vacuum (LDV) is an environmentally friendly and high-tech method of processing food waste, which allows for high-quality dehydration of the product while maintaining the original structure and percentage of biologically useful components. The authors of the article analyze and select the optimal modes of dehydration, during which the temperature range for the most economical and productive mode of the drying process is determined. In addition, the article describes the automated installation of the LDV, which is designed to demonstrate the capabilities of the LDV technology and to work out the modes of dehydration of various substances with an initial humidity of 65 % to 98 %. This unit can be used both for waste processing and for the manufacture of food products. The results showed that the LDV technology is effective, high-tech and environmentally friendly, and its applications start from the processing of waste of various types of production and end with the manufacture of food.

Keywords

Dehydration, low-temperature dehydration, vacuum drying, LDV technology, automatic control system, waste processing, LDV equipment, temperature regime

Received 02.07.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Kakova rol' ekologii v zhizni sovremennogo cheloveka? [What's the role of ecology in a life of modern person?] *litgt.rgups.ru: website* (in Russ.). URL: <http://litgt.rgups.ru/wp-content/uploads/2018/06/1-Rol'-ekologii-v-obshchestve.pdf> (accessed: 12.02.2018).
- [2] Veselova E.L. Opređenje zakonornostey obezvozhvaniya v vakuume i razrabotka struktury avtomatizirovannogo oborudovaniya. Diss. kand. tekh. nauk [Defining dehydration law in vacuum and structure development for automated machinery. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1998 (in Russ.).
- [3] Sagar V.R., Kumar P.S. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *J. Food Sci. Technol.*, 2010, vol. 47, no. 1, pp. 15–26. DOI: 10.1007/s13197-010-0010-8 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs13197-010-0010-8>

-
- [4] Nadi F., Tzempelikos D. Vacuum drying of apples (cv. Golden Delicious): drying characteristics, thermodynamic properties, and mass transfer parameters. *Heat Mass Transfer*, 2018, vol. 54, no. 7, pp. 1853–1866. DOI: 10.1007/s00231-018-2279-5 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-018-2279-5>
- [5] Veselova E.L. Dehydration in vacuum. Technology physics. Application. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* [Handbook. An Engineering journal], 1998, no. 1, pp. 18–20 (in Russ.).
- [6] Kovalev L.K. Low-temperature dehydration of high-humidity organic substances in vacuum. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* [Handbook. An Engineering journal], 1998, no. 2, pp. 47–48 (in Russ.).
- [7] Kovalev L.K., Ryabov V.T., Kovaleva N.L., et al. Structure synthesis of control systems for technological equipment. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal* [Handbook. An Engineering journal], 1998, 2002, no. 3, pp. 10–16 (in Russ.).
- [8] Kovaleva N.L. Razrabotka i issledovanie protsessa i oborudovaniya nizkotemperaturnogo ispareniiya vlagosoderzhashchikh veshchestv v vakuume. Diss. kand. tekhn. nauk [Development and study on process and equipment of low-temperature vacuum evaporation of wet substances. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, MIEM Publ., 2004 (in Russ.).
- [9] Kostin A.M., Markov V.P., Shvab V.V., et al. Ustroystvo dlya nizkotemperaturnogo obezvozhivaniya i sushki materialov v vakuume [Device for low-temperature vacuum dehydration and drying of materials]. Patent 2379604 RF. Appl. 17.12.2008., publ. 20.01.2010 (in Russ.).

Galuzin A.A. — Postgraduate, Department of Electronic technologies in mechanical engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Ryabov V.T., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Electronic technologies in mechanical engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Galuzin A.A. Research of the process of low-temperature dehydration in vacuum. *Politekhnikeskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2019, no. 9(38). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-9-525.html> (in Russ.).