

Доцент Д.А. Казарцев, доцент А.В. Журавлев,
доцент И.С. Юрова, соискатель А.В. Бородкина
(Воронеж. гос. ун-т. инж. технол.) кафедра машин и аппаратов пищевых производств.
тел. (473) 255-38-96

Associate professor D.A. Kazartsev, associate professor A.V. Zhuravlev,
associate professor I.S. Yurova, applicant A.V. Borodkina
(Voronezh state university of engineering technologies) Department of machines and equip-
ment for food production. phone (473) 255-38-96

Исследование кинетики сушки семян расторопши в вихревой камере с СВЧ-энергоподводом

Investigation of the kinetics of drying seeds thistle in vortex chamber with microwave energy supply

Реферат. При изучении современного состояния теории, техники и технологии переработки расторопши обнаружился ряд проблемных моментов. Один из таких моментов - необходимость в кратчайшие сроки обеспечить качественный и эффективный процесс сушки семян. Однако в России не выпускается специальное оборудование, предназначенное для послепосевной переработки семян расторопши, а используемая для сушки зерна отечественная техника, представленная в основном шахтными и барабанными сушилками, не совсем пригодна для расторопши. Это связано с тем, что, во-первых, в процессе обезвоживания необходимо обеспечить достаточно низкую конечную влажность высушиваемого продукта (5-6 %), а, во-вторых, сохранить его полезные вещества в полном объеме, что накладывает дополнительные ограничения на режимы сушки. Одним из путей создания новой сушильной техники является разработка и внедрение в промышленность высокоинтенсивных аппаратов с активными гидродинамическими режимами с СВЧ-энергоподводом, обеспечивающих во многих случаях более высокие технико-экономические показатели. Поэтому применение аппаратов с закрученным потоком теплоносителя для интенсификации процесса сушки дисперсных материалов представляет, как теоретический интерес, так и практическую ценность. СВЧ-сушка основана на том, что диэлектрические свойства воды и сухих веществ пищевых продуктов различаются: влажный материал значительно быстрее нагревается, чем сухой. В процессе СВЧ-сушки температура более влажных внутренних слоев выше, чем наружных, более обезвоженных (что и создает «правильное» - от внутренних к внешним слоям продукта - направление градиента массо- переноса влаги, не реализуемое ни в одном из иных известных методов сушки). Семена расторопши имеют уникальный состав: 25-32 % жирного масла, 15-17 % протеина, 26 % клетчатки, водорастворимые (группы В) и жирорастворимые (А, D, Е, К, F) витамины, моно- и дисахариды, макро- и микроэлементы (медь, цинк, селен), пищевые волокна и ферменты, слизи до 5 % (глюкоза и др.), фенольные соединения, в том числе флаволигнаны 2-3 % (силибинин, силикрестин, силидианин и др.), азотсодержащие соединения: бетанин, смолы, до 0,1 % эфирного масла и другие вещества. Жирное масло плодов расторопши включает линолевую – 52-62 %, олеиновую – 18-25 %, а также миристиновую, пальмитиновую, стеариновую, бегеновую, арахидоновую кислоты, токоферолы. Продукты из семян расторопши благотворно влияют на обмен веществ, повышают сопротивляемость организма к различным заболеваниям, обладают антиаллергенными и детоксикационными свойствами.

Summary. In the study of the current state of the theory, techniques and technologies for processing of milk thistle showed up a number of problems. One of those moments - the need to promptly provide quality and efficient process for drying seeds, but Russia has not produced special equipment for postharvest processing of seeds of milk thistle, and used for drying grain domestic appliances, represented mainly by mining and drum dryers, it is not suitable for thistle. This is due to the fact that, firstly, in the dewatering process is necessary to provide a relatively low final moisture drying product (5-6 %), and, secondly, to keep their beneficial substance in full, which imposes additional restrictions on the conditions of drying. One way of creating a new drying technology development and implementation in the industry of high-intensive devices with active hydrodynamic regimes with microwave energy supply, providing in many cases, higher technical and economic indicators. Therefore, the use of devices with swirling flow of heat-carrier for the intensification of the process of drying of dispersed materials is both theoretical interest and practical value. Microwave drying is based on the fact that the dielectric properties of water and dry food substances are different: the wet material is heated much faster than dry. During the microwave drying temperature wetter internal layers higher than the exterior more dehydrated (which creates a "right" - from the inner to the outer layers of the product - the gradient of moisture mass transfer is not realizable in any of the other known methods of drying). Milk thistle seeds have a unique composition: 25-32 % fatty oil, 15-17 % protein, 26 % fat, in the-soluble (B group) and fat-soluble (A, D, E, K, F) vitamins, mono- and disaccharides, macro- and trace elements (copper, zinc, selenium), dietary fiber and enzymes, mucus, up to 5 % (glucose, etc.), phenolic compounds including flavolignans 2-3% (silibinin, silychristin, silydianin, and others.), with nitrogen-compound: betanin, resins, 0.1 % essential oils and other substances. Fatty oil comprises linoleic – 52-62 %, oleic – 18-25 % and myristic, palmitic, stearic, behenic, arachidonic acid, tocopherols. Products of the seeds of thistle beneficial effect on metabolism, increase the body's resistance to various diseases, have anti-allergic and detoxifying properties.

Ключевые слова: сушка, расторопша, исследование, вихревой, тепло-массообмен, СВЧ-энергоподвод.

Keywords: drying, milk thistle, research, vortex, heat and mass transfer, the microwave energy supply.

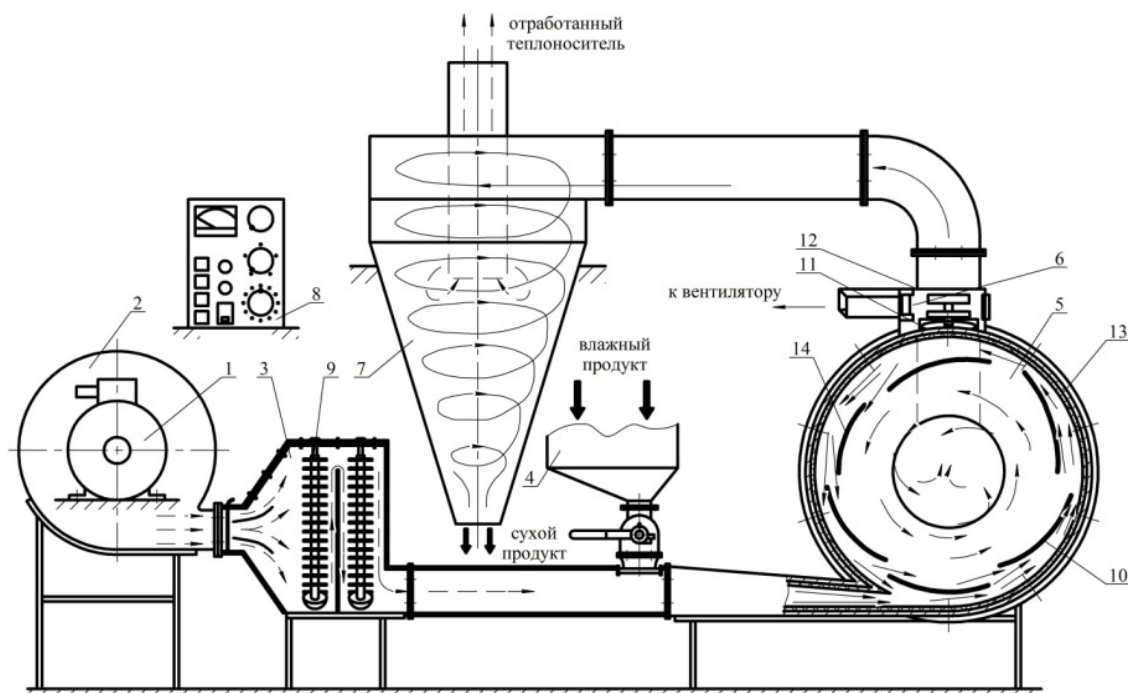
© Казарцев Д.А., Журавлев А.В.,
Юрова И.С., Бородкина А.В., 2015

Расторопша пятнистая обладает большим потенциалом использования в пищевой и комбикормовой промышленности и нашла широкое распространение в сельском хозяйстве России. Она широко используется в мировой практике в качестве сырья для производства лекарственных препаратов. Продукты из семян расторопши благотворно влияют на обмен веществ, повышают сопротивляемость организма к различным заболеваниям, обладают антиаллергенными и детоксикационными свойствами.

При изучении современного состояния теории, техники и технологии переработки расторопши обнаружился ряд проблемных моментов. Один из таких моментов - необходимость в кратчайшие сроки обеспечить качественный и эффективный процесс сушки семян, но в России не выпускается специальное оборудование, предназначенное для послеуборочной переработки семян расторопши.

Для проведения экспериментальных исследований в лаборатории интенсивных методов сушки кафедры «Машины и аппараты пищевых производств» Воронежского государственного университета инженерных технологий нами была изготовлена установка, представленная на рисунке 1, позволяющая проводить процесс СВЧ-сушки в вихревом потоке теплоносителя при различных режимах, контролировать и регистрировать необходимые параметры протекания процесса.

Основными компонентами установки являются: электродвигатель 1, приводящий в движение крыльчатку вентилятора 2, калорифер 3 с оребренными воздушными ТЭНами 9 для подогрева теплоносителя, бункер загрузки 4, вихревая сушильная камера 5, снабженная СВЧ – излучателем 6, осадительный циклон 7, пульт управления 8.



1- электродвигатель; 2- вентилятор; 3- калорифер; 4- бункер загрузки; 5- сушильная камера; 6- СВЧ – излучатель; 7- циклон осадительный; 8- пульт управления; 9- ТЭН воздушный; 10- локальные ускорители потока; 11- волновод; 12- экран защитный; 13- покрытие фторопластовое; 14- направляющие вставки

Рисунок 1. Схема экспериментальной установки для СВЧ-сушки

Вихревая сушильная камера 5 дискового типа представляет собой цилиндр диаметром 0,6 м и шириной 0,15 м покрытый слоем теплоизоляции. Сушильная камера 5 изнутри имеет фторопластовое покрытие 13, способствующее уменьшению коэффициента трения частиц о внутреннюю поверхность камеры. В верхней части камеры расположен СВЧ – излучатель 6, работающий на ча-

стоте 2450 МГц, встроенный в волновод 11, обеспечивающий подвод СВЧ – энергии внутрь сушильной камеры. Внутри сушильной камеры на её боковой поверхности установлены локальные ускорители потока теплоносителя и направляющие вставки, выполненные из радиопрозрачного материала для беспрепятственного пропускания электромагнитных волн и исключения неравно-

мерности распределения СВЧ – энергии. В нижней части фронтальной стенки сушильной камеры 5 установлен пробоотборник (на рисунке не показан), позволяющий отбирать продукт из камеры без остановки сушилки.

Установка работает следующим образом.

Небольшая часть теплоносителя (воздуха) засасывается вентилятором 2 через защитный экран 12 СВЧ – излучателя 6; оставшаяся, основная, часть теплоносителя поступает в вентилятор 2 из окружающей среды. Далее теплоноситель подается в калорифер 3, где нагревается до необходимой температуры, проходя через оребренные воздушные ТЭНы 9. Температуру теплоносителя можно менять в зависимости от влажности исходного продукта, путем плавного регулирования напряжения электрического тока питания нагревательных элементов калорифера 3. Из калорифера 3 поток горячего теплоносителя подается в сушильную камеру 5 по периферии тангенциально вместе с исходным влажным продуктом, частицы которого поступают во входной патрубок через бункер загрузки 4, и далее направляются в вихревую сушильную камеру 5, где происходит процесс интенсивной сушки кольцевого вращающегося слоя продукта, расположенного, в основном, в периферийной зоне камеры.

Важную роль в предотвращении «распада» вращающегося слоя играют локальные ускорители потока 10 и направляющие вставки 14. Локальные ускорители потока 10 теплоносителя закреплены таким образом, чтобы сформировать устойчивый вращающийся кольцевой слой высушиваемых частиц материала и исключить возможность их накопления в зоне максимального сопротивления движению частиц. Направляющие вставки 14, отделяющие высушенные частицы от основного вращающегося кольцевого слоя и направляющие их в центральную зону вихревой сушильной камеры, расположены в зоне возврата частиц к точке подъема.

Интенсификация тепло - и массообмена в процессе сушки происходит также за счет воздействия СВЧ – энергии на частицы продукта.

Необходимое охлаждение СВЧ – излучателя 6 осуществляется путем всасывания наружного воздуха в вентилятор 2 через защитный экран 12 излучателя 6. Контакт СВЧ – излучателя 6 с частицами продукта препятствует фторопластовое покрытие 13 внутренней поверхности корпуса вихревой сушильной камеры 5, свободно пропускающее СВЧ – излучение.

В процессе сушки более влажные частицы продукта под воздействием СВЧ – энергии нагреваются более интенсивно, чем частицы, имеющие меньшую влажность, таким образом, происходит выравнивание влажности материала. Поэтому температура теплоносителя может быть снижена

на 20-40 °С, чем в случае только конвективного подвода тепловой энергии.

Кроме того, интенсификация процесса сушки достигается за счет равномерного распределения СВЧ-поля по объему сушильной камеры 5 в результате сочетания «правильной» цилиндрической формы камеры и специально подобранной конструкции волновода 11.

Частицы высушенного продукта захватываются потоком теплоносителя и выносятся через центральное отверстие в вихревой сушильной камере 5 в осадительный циклон 7, где происходит интенсивное разделение высушенной твердой и отработанной газовых фаз потока.

Сухой продукт выводится через отверстие в конической части осадительного циклона 7, а отработанный теплоноситель выводится в атмосферу.

Экспериментальная установка снабжена приборами и устройствами для управления и контроля технологических параметров процесса.

Для исследования кинетики сушки семена расторопши предварительно увлажнялись до необходимой начальной влажности. При проведении эксперимента сначала установка выводилась на заданный режим путем ее прогрева горячим воздухом в течение 20-25 минут. Параметры процесса поддерживались постоянными в интервале значений: начальное влагосодержание семян от 16 до 28 %; температура сушильного агента от 338 до 368 К; СВЧ – мощность от 350 до 700 Вт. Отбор проб осуществлялся с интервалом в 2 минуты. Влажность семян расторопши определялась методом высушивания до постоянной массы на влагомере при температуре 378 К.

Полученные результаты экспериментов в виде кривых сушки и температурных кривых плодов черной смородины представлены на рисунках 2-7.

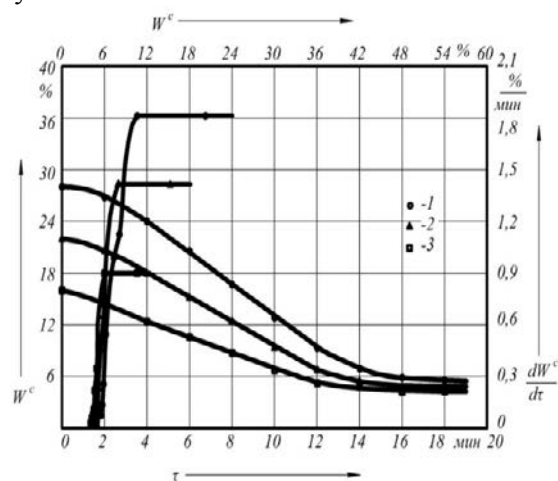


Рисунок 2. Кривые сушки и скорости сушки семян расторопши при $T=353$ К, $P=525$ Вт/кг:
1 – $W^c = 28$ %; 2 – $W^c = 22$ %; 3 – $W^c = 16$ %

Влияние начального влагосодержания семян на кинетику сушки и температуру нагрева материала в процессе сушки представлено на рисунок 2 и рисунок 3.

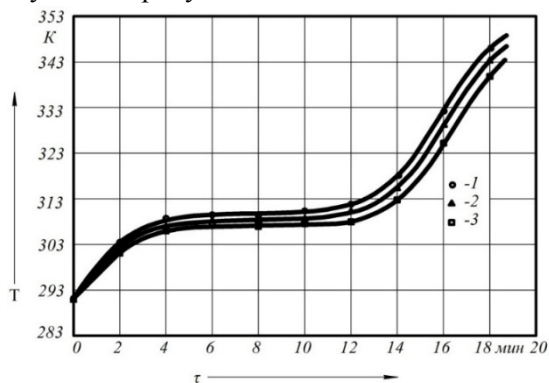


Рисунок 3. Температурные кривые семян рапсостеи при $T=338\text{ K}$, $P=525\text{ Вт/кг}$:
1 – $W^c = 28\%$; 2 – $W^c = 22\%$; 3 – $W^c = 16\%$

Из графиков (рисунок 2) видно, что начальное влагосодержание семян оказывает существенное влияние на скорость сушки, что подтверждает результаты многих исследователей. Следует отметить, что процесс испарения влаги с поверхности семян отличается от процесса испарения влаги со свободной поверхности, так как скорость сушки семян с различным начальным влагосодержанием, при прочих равных условиях, различна.

С повышением начального влагосодержания скорость сушки увеличивается. Избыток поверхностной влаги оказывает влияние не только на скорость первого периода, но и на скорость последующих периодов сушки. Это связано с влиянием свободной влаги на усадку, изменение капиллярной структуры материала, образование микротрещин и т.д.

Следует отметить, что начальное влагосодержание семян рапсостеи влияет на соотношения периодов постоянной и убывающей скоростей сушки. С ростом влагосодержания увеличивается величина критического влагосодержания и увеличивается доля периода убывающей скорости сушки. Отмеченная закономерность объясняется различной связью влаги с белками и крахмалом семян. Гигроскопичность белкового комплекса семян выше, чем гигроскопичность крахмала, а скорость сушки белков ниже. В семенах с высокой начальной влажностью количество более прочно связанной влаги больше. И хотя скорость сушки в начале процесса довольно велика из-за удаления влаги крахмала, первый период быстро заканчивается, и дальнейший характер протекания процесса определяется сушкой белкового комплекса.

Поскольку сушка белка происходит с меньшей скоростью, наступает период убывающей скорости сушки.

Анализ температурных кривых (рисунок 3) показал, что увеличение начального влагосодержания приводит к увеличению температуры материала. Это связано с повышением коэффициента диэлектрических потерь ϵ'' с увеличением влагосодержания.

Таким образом, высокое начальное влагосодержание вещества приводит не только к увеличению длительности сушки, и длительности температурного воздействия на термолабильные компоненты, но и к более высоким температурам материала в процессе сушки. Из этого следует, что сушку семян рапсостеи с высоким начальным влагосодержанием следует проводить при более мягких режимах.

Влияние температуры теплоносителя на кинетику сушки и температуру нагрева семян рапсостеи в процессе сушки представлено на рисунке 4 и рисунке 5.

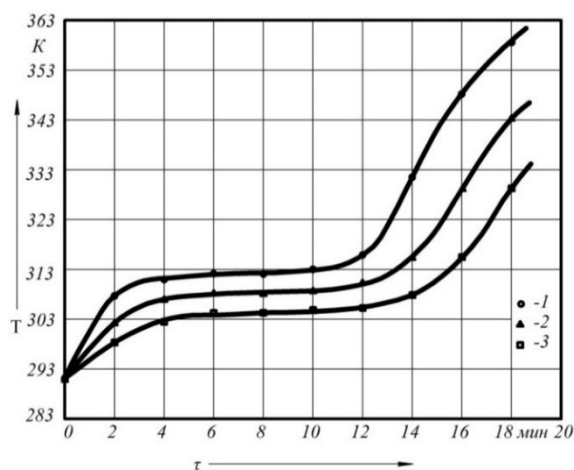


Рисунок 4. Температурные кривые семян рапсостеи при $W^c = 22\%$ и $P=525\text{ Вт/кг}$:
1 – $T=338\text{ K}$; 2 – $T=353\text{ K}$; 3 – $T=368\text{ K}$

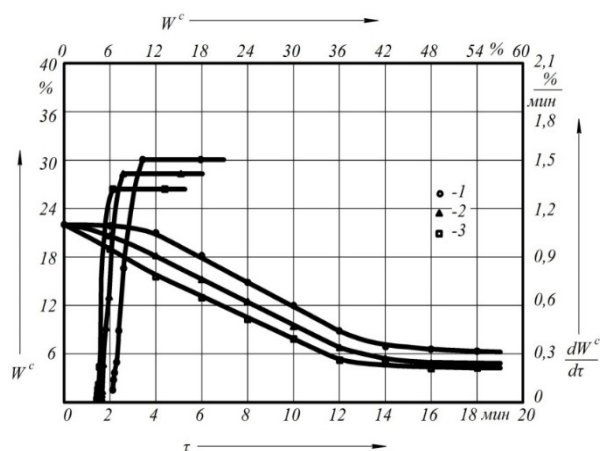


Рисунок 5. Кривые сушки и скорости сушки семян рапсостеи при $W^c = 22\%$ и $P=525\text{ Вт/кг}$:
1 – $T=338\text{ K}$; 2 – $T=353\text{ K}$; 3 – $T=368\text{ K}$

Полученные кривые свидетельствуют о том, что температура является одним из наиболее существенных факторов, влияющим на скорость сушки семян. Следует отметить, что температура теплоносителя оказывает влияние на соотношения периодов постоянной и убывающей скоростей сушки. С повышением температуры наблюдается снижение критического влагосодержания. Это объясняется тем, что увеличение температуры интенсифицирует внутреннюю диффузию влаги, а также увеличением доли связанной влаги, испарение которой происходит в первый период сушки.

Из графиков видно, что наибольшая часть влаги удаляется в период постоянной скорости сушки. Это объясняется тем, что семена рапсостеблели содержат большое количество осмотической и адсорбционно-связанной влаги. Наличие периода постоянной скорости сушки говорит о том, что интенсивность диффузии влаги превышает интенсивность влагообмена.

Из анализа температурных кривых, представленных на рисунке 4 следует, что применение низких температур сушильного агента обеспечивает большую равномерность теплового воздействия в течение всего процесса.

Влияние СВЧ-мощности на кинетику сушки и температуру нагрева семян рапсостеблели в процессе сушки представлено на рисунке 6 и рисунке 7.

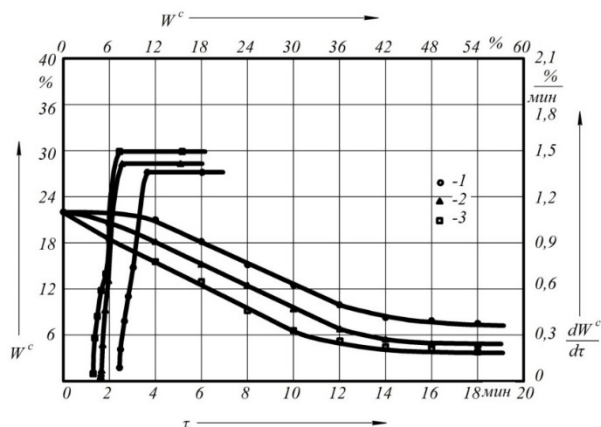


Рисунок 6. Кривые сушки и скорости сушки семян рапсостеблели при $W^c = 22\%$ и $T = 353\text{ К}$:
1 — $P = 350\text{ Вт/кг}$; 2 — $P = 525\text{ Вт/кг}$; 3 — $P = 700\text{ Вт/кг}$

Из графиков видно, что СВЧ-мощность оказывает влияние на кинетику сушки подобно температуре сушильного агента.

Отличием воздействия СВЧ-энергии от воздействия температуры сушильного агента на продукт является то, что подводимая СВЧ-мощность в меньшей степени оказывает влияние на

критическое влагосодержание. Соотношения периодов постоянной и убывающей скоростей сушки определяются только формами связи влаги с материалом, что положительно сказывается на качестве высушиваемого материала.

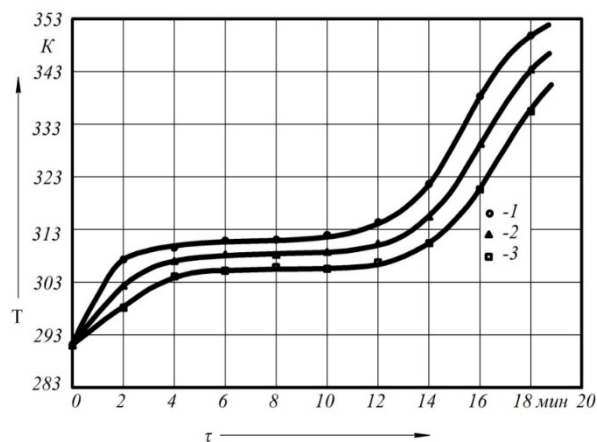


Рисунок 7. Температурные кривые семян рапсостеблели при $W^c = 22\%$ и $T = 353\text{ К}$:

1 — $P = 350\text{ Вт/кг}$; 2 — $P = 525\text{ Вт/кг}$; 3 — $P = 700\text{ Вт/кг}$

Следует отметить, что повышение СВЧ-мощности в периоде убывающей скорости сушки позволяет в значительной степени интенсифицировать процесс.

С понижением влажности рапсостеблели происходит уменьшение коэффициента диэлектрических потерь, что приводит к снижению количества теплоты, генерируемой в продукте, однако согласно закону Джоуля-Ленца эффективность преобразования энергии переменного электромагнитного поля (ЭМП) в теплоту пропорциональна квадрату напряженности ЭМП, поэтому увеличение подводимой СВЧ-мощности способствует увеличению КПД процесса трансформации СВЧ-энергии.

СВЧ-энергия позволяет в значительной степени интенсифицировать процесс сушки, однако, чрезмерное увеличение подводимой СВЧ-мощности может привести к возникновению большого градиента влагосодержания, и, как следствие, образованию трещин и нарушению структуры семян.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования кинетики сушки семян рапсостеблели позволили сделать вывод, что сочетание высокочастотного способа подвода теплоты с вихревым потоком теплоносителя является оптимальным решением для интенсивной сушки семян рапсостеблели. Такая комбинация позволяет управлять градиентами влагосодержания и температуры, изменяя их направления, что существенно сказывается на качестве получаемого сухого продукта.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Антипов С.Т., Казарцев Д.А., Журавлев А.В., Виниченко С.А. Исследование кинетики сушки плодов черной смородины в вакуум-аппарате с СВЧ-энергоподводом // Вестник ВГУИТ. 2013. № 4. С. 26-31.
- 2 Алексанян И.Ю., Максименко Ю.А., Феклунова Ю.А., Пшеничная Н.Э. Конвективно-радиационная распылительная сушилка для жидких и пастообразных пищевых материалов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2015. № 3 (7). С. 57-61.
- 3 Кретов И.Т., Казарцев Д.А., Журавлев А.В., Юрова И.С. Проблема переработки семян расторопши в России // Финансы. Экономика. Стратегия. 2010. № 6. С. 43-46.
- 4 Гавриленков А.М., Емельянов А.Б., Шаров А.В. Экологические аспекты интенсификации конвективной сушки // Вестник ВГУИТ. 2012. № 3. С. 137-139.
- 5 Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
- 6 Kudra T., Mujumdar A.S. Advanced Drying Technologies. 2nd Ed. New York: Taylor S Francis, 2009. 500 p.

REFERENCES

- 1 Antipov S.T., Kazartsev D.A., Zhuravlev A.V., Vinichenko S.A. Investigation of the kinetics of drying fruits of black currant in a vacuum apparatus with the microwave energy supply. *Vestnik VGUIT*. [Proceedings of VSUET], 2013, no. 4, pp. 26-31. (In Russ.).
- 2 Aleksanyan I.Yu., Maksimenko Yu.A., Feklunova Yu.A., Pshenichnaya N.E. Convection-radiation spray dryer for liquid and paste-like food materials. *Tekhnologiya pishchevoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti*. [Technology of food processing industry AIC - healthy food]. 2015, no. 3 (7), pp. 57-61. (In Russ.).
- 3 Kretov I.T., Kazartsev D.A., Zhuravlev A.V., Yurova I.S. The problem of processing the seeds of milk thistle in Russia. *Finansy. Ekonomika. Strayegiya*. [Finances. Economy. Strategy], 2010, no. 6, pp. 43-46. (In Russ.).
- 4 Gavrilencov A.M., Emelyanov A.B., Sharov A.V. Environmental aspects of the intensification of convective drying. *Vestnik VGUIT*. [Proceedings of VSUET], 2012, no. 3, pp. 137-139. (In Russ.).
- 5 Lykov A.V. Teoriya sushki [The theory of drying]. Moscow, Energiya, 1968. 472 pp. (In Russ.).
- 6 Kudra T., Mujumdar A.S. Advanced Drying Technologies. 2nd Ed. New York: Taylor S Francis, 2009. 500 p.