

Профессор С.Т. Антипов, доцент Д.А. Казарцев,  
доцент А.В. Журавлев, аспирант С.А. Виниченко  
(Воронеж. гос. ун-т. инж. технол.) кафедра машин и аппаратов пищевых производств,  
тел. (473) 255-38-96

## Исследование кинетики сушки плодов черной смородины в вакуум-аппарате с СВЧ-энергоподводом

Представлены результаты проведенных экспериментальных исследований сушки плодов черной смородины в вакуум-аппарате с СВЧ-энергоподводом. Предложен новый способ сушки и установка для его осуществления. Изучено влияние основных факторов на кинетику сушки и температуру нагрева черной смородины.

Results of the conducted pilot researches of drying of fruits of black currant in the vacuum apparatus with microwave energy supply are presented. The new way of drying and installation for its implementation is offered. The influence of major factors on kinetics of drying and temperature of heating of black currant is studied.

*Ключевые слова:* сушка, черная смородина, исследование, вакуум, тепло- и массообмен, СВЧ-энергоподвод.

Ягоды и фрукты являются наилучшим источником витаминов, минеральных веществ и микроэлементов, которые нормализуют жизнедеятельность организма человека, имеют лечебные свойства и оказывают содействие профилактике заболеваний. Для продолжительной сохранности фруктов и ягод необходима специальная обработка с целью предупреждения их порчи. Одним из видов такой обработки является сушка.

Для точных расчетов процессов и аппаратов для сушки, а также оптимизации и интенсификации процесса не достаточны знания только свойств высушиваемого материала как объекта сушки, необходимо также знать кинетические характеристики и особенности термодинамики [1].

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 вакуум-СВЧ сушки при различных режимах, контролировать и регистрировать необходимые параметры протекания процесса.

Установка состоит из следующих основных узлов: вакуумной камеры 1, внутри которой помещена металлическая сетка 11. На раме 2 размещена система удаления паров 3, вакуумный насос 4, пульт управления насосом 5, блок управления 6. Снаружи вакуумной камеры 1 находится манометр 7, магнетрон 8, вентилятор 9, смотровое окно 10.

Порция исследуемого продукта помещается на металлическую сетку 11. Вакуумная камера 1 герметично закрывается. Вакуумным насосом 4 в ней создается необходимое давление, которое регистрируется манометром 7. Блок управления 6 содержит кнопки включения и регулирования системы СВЧ-энергоподвода. После того как в камере создано необходимое остаточное давление включают магнетрон 8 и вентилятор охлаждения 9. При помощи тумблера на блоке управления 6 задают требуемую мощность электромагнитного излучения. Спуск давления происходит посредством системы удаления паров 3, которая содержит запорный вентиль. Отбор проб осуществляется через определенные промежутки времени в зависимости от графика проведения эксперимента.

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

На основании литературных данных из множества факторов, влияющих на процесс сушки, для исследования были выбраны следу-

ющие: СВЧ-мощность  $P$ , высота слоя продукта  $h$ , давление в сушильной камере  $p$ . От этих параметров зависит не только скорость сушки, но и качество высушиваемого материала.

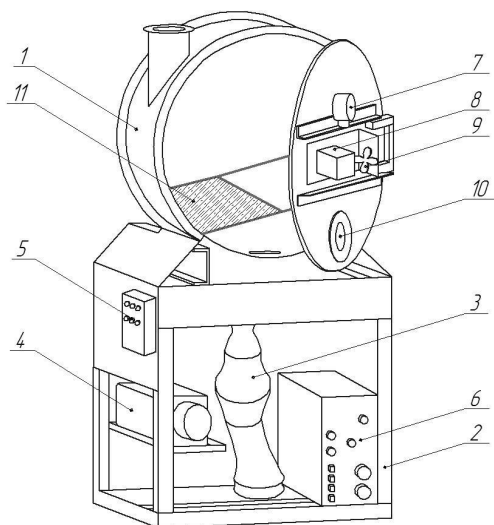


Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки:  
1 – камера вакуумная; 2 – рама; 3 – система удаления паров; 4 – вакуумный насос; 5 – пульт управления насосом; 6 – блок управления; 7 – манометр; 8 – магнетрон; 9 – вентилятор; 10 – смотровое окно, 11 – сетка металлическая.

Для проведения эксперимента использовался сорт черной смородины «Орловская сирена». Навески продукта массой 0,2 кг помещали в камеру. В камере создавался вакуум от 0,5 кПа до 1 кПа. Энергоподвод осуществлялся при помощи магнетрона. Мощность магнетрона регулировалась при помощи реле, установленного на блоке управления. Отбор проб проводился каждые 5 мин. Температура нагрева продукта регистрировалась при помощи пирометра АКПП 9303.

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

Влияние СВЧ-мощности на кинетику сушки и температуру нагрева черной смородины представлено на рисунке 2 и рисунке 3.

Нагрев влажных материалов в переменном электрическом поле основан на явлении поляризации в диэлектриках. При нагреве диэлектрических материалов в поле сверхвысокой частоты происходит преобразование энергии электромагнитного поля в тепловую за счет диэлектрических потерь, которые зависят от электрофизических свойств, влагосодержания и строения материала.

В отличие от обычных методов сушки, для которых перенос влаги внутри тела происходит под действием градиентов влагосодержания и температуры, при сушке в поле сверхвысокой частоты на перенос влаги основное влияние оказывает напряженность электрического и магнитного полей.

Под действием электрического поля происходит интенсивное выделение тепла и энергия, затраченная на поляризацию влажного тела, генерируется в виде тепла.

Количество выделяемого тепла в единице объема материала ( $\text{Вт} / \text{м}^3$ ) определяется по формуле:

$$Q_V = 5,55 \cdot \varepsilon_\mu \cdot \text{tg}\delta \cdot \nu \cdot E^2 \cdot 10^{-11}, \quad (1)$$

где  $E$  – напряженность внешнего электрического поля, В/м;  $\varepsilon_\mu$  – диэлектрическая постоянная нагреваемого материала;  $\text{tg}\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $\nu$  – частота электрического поля, Гц.

Испарение влаги, в отличие от конвективной сушки, происходит во всем объеме тела, причем в центре тела больше, чем на поверхности, что вызывает возникновение градиента давления, который сильно влияет на перенос пара внутри тела.

Интенсивность переноса влаги внутри тела при сверхвысокочастотном нагреве характеризуется величиной критерия Померанцева:

$$Po = \frac{Q_V \cdot R_V^2}{\lambda_{вл} \cdot T_M}, \quad (2)$$

где  $R_V^2$  – характерный размер тела, м;  $\lambda_{вл}$  – теплопроводность влажного тела,  $\text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$ ;  $T_M$  – абсолютная температура влажного тела, К.

Согласно приведенным выше зависимостям 1 и 2 можно сделать вывод, что интенсивность сушки при СВЧ-нагреве напрямую зависит от мощности электромагнитного излучения магнетрона [4].

Влияние подводимой СВЧ-мощности на кинетику сушки и температуру нагрева плодов черной смородины представлено на рисунке 2 и рисунке 3.

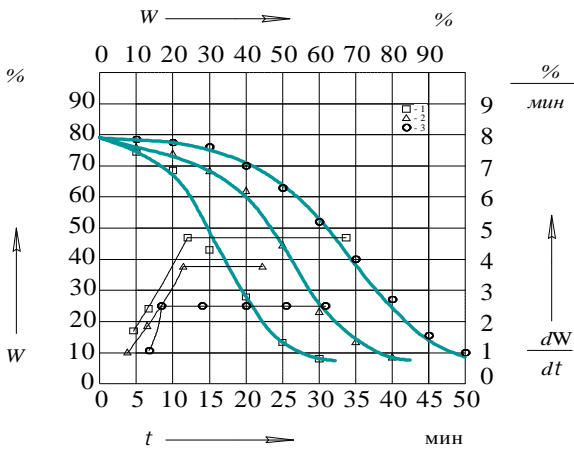


Рисунок 2 - Кривые сушки и скорости сушки плодов черной смородины: 1 -  $h=0,015\text{ м}$ ,  $p=0,75\text{ кПа}$ ,  $P=750\text{ Вт}$ ; 2 -  $h=0,015\text{ м}$ ,  $p=0,75\text{ кПа}$ ,  $P=455\text{ Вт}$ ; 3 -  $h=0,015\text{ м}$ ,  $p=0,75\text{ кПа}$ ,  $P=160\text{ Вт}$

Полученные кривые свидетельствуют о том, что подводимая СВЧ-мощность является наиболее существенным фактором, влияющим на скорость сушки плодов черной смородины.

Следует отметить, что подводимая СВЧ-мощность оказывает влияние на соотношения периодов постоянной и убывающей скоростей сушки. С повышением СВЧ-мощности не наблюдается снижение критического влагосодержания [4].

Скорость сушки прямо пропорционально зависит от подводимой СВЧ-мощности.

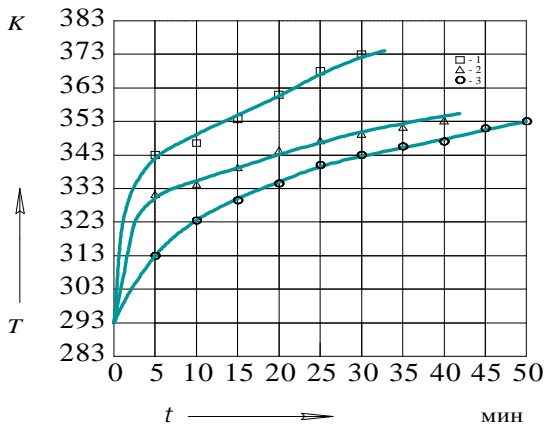


Рисунок 3 - Температурные кривые плодов черной смородины: 1 -  $h=0,015\text{ м}$ ,  $p=0,75\text{ кПа}$ ,  $P=750\text{ Вт}$ ; 2 -  $h=0,015\text{ м}$ ,  $p=0,75\text{ кПа}$ ,  $P=455\text{ Вт}$ ; 3 -  $h=0,015\text{ м}$ ,  $p=0,75\text{ кПа}$ ,  $P=160\text{ Вт}$

Заметим, что при воздействии максимальной мощности исследуемый продукт достигает температуры более 373 К, что неизбежно приводит к снижению его качественных показателей. Также чрезмерное возрастание мощ-

ности может привести к возникновению объемного напряженного состояния внутри материала, связанного с неравномерным распределением влагосодержания, образованию трещин и разрушению структуры черной смородины.

Поэтому при выборе оптимальных значений СВЧ-мощности следует ориентироваться на более мягкие режимы работы магнетрона [2].

Влияние высоты слоя плодов черной смородины на кинетику сушки и температуру нагрева в процессе сушки представлено на рисунке 4 и рисунке 5.

Из графиков видно, что высота слоя оказывает существенное влияние на скорость сушки, что подтверждает результаты многих исследователей.

Проведенные экспериментальные исследования процесса обезвоживания плодов черной смородины показали, что с уменьшением высоты слоя скорость сушки в первом периоде возрастает. Это связано с тем, что градиент влагосодержания, препятствующий движению влаги к поверхности, уменьшается [4].

Во втором периоде (падающей скорости) влияние на скорость влагоудаления незначительно, так как по мере высыхания толщина слоя уменьшается и скорость сушки повышается.

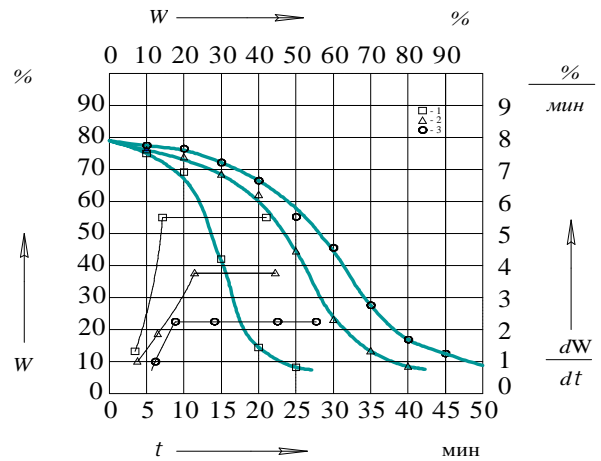


Рисунок 4 - Кривые сушки и скорости сушки плодов черной смородины: 1 -  $h = 0,005\text{ м}$ ,  $p = 75\text{ кПа}$ ,  $P = 455\text{ Вт}$ ; 2 -  $h = 0,015\text{ м}$ ,  $p = 75\text{ кПа}$ ,  $P = 455\text{ Вт}$ ; 3 -  $h = 0,025\text{ м}$ ,  $p = 75\text{ кПа}$ ,  $P = 455\text{ Вт}$

Также увеличение высоты слоя продукта в сушильной камере оказывает влияние на производительность сушилки и вызывает повышение энергозатрат на процесс обезвоживания, в свою очередь, уменьшение высоты слоя позволяет существенно интенсифицировать процесс сушки.

Анализ кривых изменения температуры черной смородины при различной высоте слоя (рисунок 5) показал, что данный параметр оказывает влияние на температуру продукта.

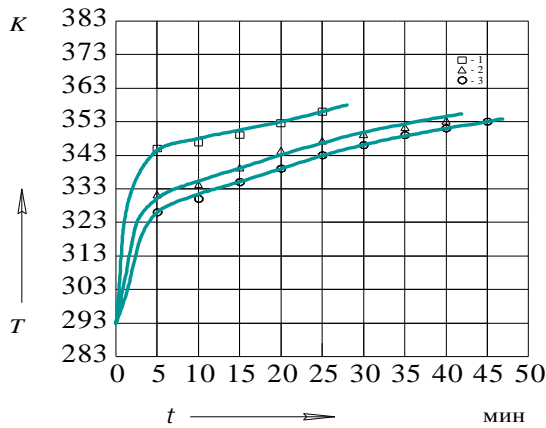


Рисунок 5 - Температурные кривые плодов черной смородины: 1 –  $h = 0,005$  м,  $p = 75$  кПа,  $P = 455$  Вт; 2 –  $h = 0,015$  м,  $p = 75$  кПа,  $P = 455$  Вт; 3 –  $h = 0,025$  м,  $p = 75$  кПа,  $P = 455$  Вт

Период прогрева плодов черной смородины характеризуется резким скачком температуры за считанные минуты. Это обусловлено особенностями воздействия СВЧ-энергии на диэлектрические материалы, коим, в свою очередь, является исследуемый продукт. Дальнейший рост температуры в период постоянной и падающей скорости сушки носит линейный характер.

В одинаковые периоды времени значения температур на графиках разнятся. Это обусловлено различной величиной температурного градиента, обратно пропорционально зависящего от расстояния между изотермическими поверхностями. Соответственно с уменьшением высоты слоя продукта, при прочих равных условиях, расстояние между изотермическими поверхностями уменьшается.

Исходя из вышеизложенного, следует, что при сушке плодов черной смородины высота слоя продукта является важным показателем, который необходимо учитывать при выборе оптимальных параметров процесса.

Влияние величины давления на кинетику сушки и температуру нагрева плодов черной смородины в процессе сушки представлено на рисунке 6 и рисунке 7.

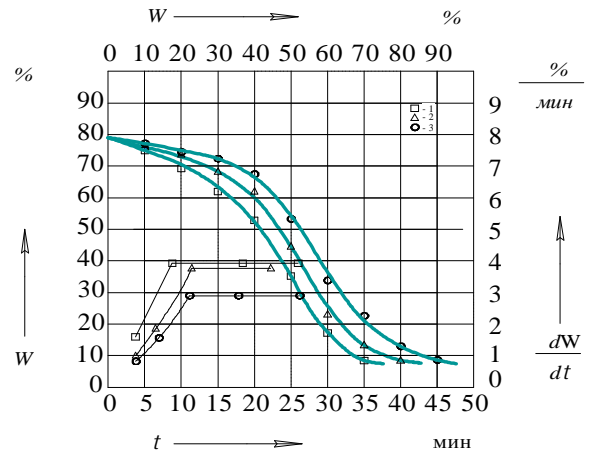


Рисунок 6 - Кривые сушки и скорости сушки плодов черной смородины: 1 –  $h = 0,015$  м,  $p = 50$  кПа,  $P = 455$  Вт; 2 –  $h = 0,015$  м,  $p = 75$  кПа,  $P = 455$  Вт; 3 –  $h = 0,015$  м,  $p = 100$  кПа,  $P = 455$  Вт

Из графиков видно, что величина давления в незначительной степени влияет на изменение скорости влагоудаления по сравнению с другими факторами. Так, например, снижение давления со 100 кПа до 50 кПа приводит к увеличению скорости первого периода с 2,95 %/мин до 3,95 %/мин. Так как создание вакуума сопряжено с повышенными энергозатратами, то снижение давления в камере следует ограничивать небольшими значениями, руководствуясь экономической целесообразностью данного процесса.

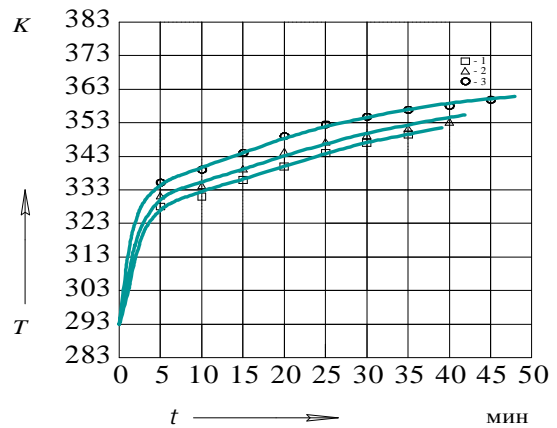


Рисунок 7 - Температурные кривые плодов черной смородины: 1 –  $h = 0,015$  м,  $p = 50$  кПа,  $P = 455$  Вт; 2 –  $h = 0,015$  м,  $p = 75$  кПа,  $P = 455$  Вт; 3 –  $h = 0,015$  м,  $p = 100$  кПа,  $P = 455$  Вт

Из анализа температурных кривых (рисунок 7) следует, что величина давления также незначительно сказывается на температуре

высушиваемого материала. Распределение температур происходит по параболическому закону. Вид кривых идентичен. Следует отметить, что при снижении давления в камере температура продукта в процессе сушки снижается незначительно.

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

Нами исследован диэлектрический нагрев слоя черной смородины с использованием СВЧ-энергии частотой 2450 МГц. Данный метод обеспечивает интенсивный прогрев материала по всему объему. При увеличении внутренней энергии слоя создается положительный температурный перепад в материале, способствующий ускорению продвижения влаги к поверхности в процессе сушки [3].

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что для интенсификации процесса сушки черной смородины следует применять неглубокий вакуум с использованием СВЧ-энергии. Этот способ обеспечивает высокое качество готового продукта и значительно увеличивает скорость обезвоживания черной смородины.

## ЛИТЕРАТУРА

1 Антипов, С.Т. Исследование процесса сушки яблок в аппарате с конвективным и СВЧ-энергоподводом [Текст] / С.Т. Антипов, Д.А. Казарцев, А.В. Журавлев, А.А. Селин // Вестник ВГТА. – 2009. - № 1. – С. 48-52.

2 Антипов, С.Т. Тепло- и массообмен при сушке семян кориандра в аппарате с СВЧ-энергоподводом [Текст] / С.Т. Антипов, Д.А. Казарцев. – Воронеж: ВГТА, 2007. – 144 с.

3 Антипов, С. Т. Тепло– и массообмен при сушке яблок в аппарате с комбинированным энергоподводом [Текст] / С. Т. Антипов, Д. А. Казарцев, А. В. Журавлев, А.А. Селин. – Воронеж: ВГТА, 2009. – 154 с.

4 Лыков, А. В. Теория сушки [Текст] / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

## REFERENCES

1 Antipov, S.T. Investigation of drying apples in the machine with a convection and microwave energy supply [Text] / S.T. Antipov, D.A. Kazartsev, A.V. Zhuravlev, A.A. Selin // Bulletin of VSTA. - 2009. - № 1. - P. 48-52.

2 Antipov, S.T. Heat and mass transfer during drying of coriander seeds in the device with microwave energy supply [Text] / S.T. Antipov, D.A. Kazartsev. - Voronezh: VSTA, 2007. - 144 p.

3 Antipov, S.T. Heat and mass transfer during drying of apples in the machine with a combined energy supply [Text] / S.T. Antipov, D.A. Kazartsev, A.V. Zhuravlev, A.A. Selin. - Voronezh: VSTA, 2009. - 154 p.

4 Lykov, A.V. Theory of drying [Text] / A.V. Lykov. – M.: Energiya, 1968. - 472 p.