

Профессор Г.В. Калашников, ассистент Е.В. Литвинов
(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра машин и аппаратов пищевых производств.
тел. (473) 255-38-96
E-mail: kagen5@yandex.ru, zenlit@yandex.ru

Professor G.V. Kalashnikov, assistant E.V. Litvinov
(Voronezh state university of engineering technology) Department of machines and
devices of food manufactures. phone (473) 255-38-96
E-mail: kagen5@yandex.ru, zenlit@yandex.ru

Тепловой анализ ресурсосберегающей линии производства фруктовых чипсов

Thermal analysis of the resource-saving technology of fruit chips manufacture

Реферат. Выполнен тепловой анализ тепломассообменных процессов при влаготепловой обработке фруктов для производства фруктовых чипсов. Предложена ресурсосберегающая технологическая схема переработки плодов и производства фруктовых чипсов на основе конвективной и СВЧ-сушки. Составлена методика и приведены результаты расчета тепловых затрат для различных схем производства яблочных чипсов. Определены тепловые затраты для базового и предлагаемого вариантов на основе балансовых соотношений технологических процессов и разработанной аппаратно-технологической схемы линии производства фруктовых чипсов с замкнутым циклом использования теплоносителя и комбинированной конвективно-СВЧ-сушки плодовоовощного сырья. Используются рециркуляционный контур, подогрев исходного сырья, отработанные после сушки пар и конденсат в замкнутом контуре для создания энергосберегающей технологии производства готового продукта. Показана сравнительная тепловая эффективность контрольных поверхностей линии производства яблочных чипсов для предлагаемой технологической схемы. Определены направления совершенствования технологических схем производства яблочных чипсов. Повышению теплового КПД предлагаемой технологии способствует применение рециркуляции теплоносителя и использования теплоты вторичного пара на различных технологических стадиях, а также теплообменников с конденсатором для по-ступенчатого подогрева осушенного теплоносителя. Полезные расходы включают теплоту, затрачиваемую на нагрев и преобразование продукта. К суммарным потерям отнесены теплота неиспользованного отработанного теплоносителя, а также затраты вследствие негерметичности и режима работы рабочих камер. С целью снижения энергозатрат выполнен анализ потерь теплоты и исследованы пути их снижения. Выяснено, что потери могут быть сокращены за счет использования отработанного после сушки теплоносителя на подогрев осушенного сушильного агента и сиропа.

Summary. The thermal analysis heat- and mass-exchange of processes has been carried out at heat-moisture of handling of fruits for manufacture of fruit chips. Is suggested resource-saving the technological scheme of a line of processing of fruit and manufactures of fruit chips on the basis of convection and the microwave-drying. The technique is made and results of calculation of thermal expenses for various schemes of manufacture of apple chips are resulted. Thermal expenses for base and offered variants on the basis of balance parities of technological processes and the developed hardware-technological scheme of a line of manufacture of fruit chips with the closed cycle of use of the heat-carrier and the combined convection-microwave-drying of fruit-and-vegetable raw material are certain. Are used recirculation a contour, the heating of the initial raw material fulfilled after drying of pairs and a condensate in the closed contour for creation energy-saving of the "know-how" of a ready product. Comparative thermal efficiency of control surfaces of a line of manufacture of apple chips for the offered technological scheme is shown. Directions of perfection of technological schemes of manufacture of apple chips are certain. Improve the thermal efficiency of the proposed technology facilitates the use of coolant recycling, and the use of heat vapor at various stages of the process, as well as heat exchangers with a capacitor for on-stage heating drained coolant. Useful expenses include heat expended on heating and conversion product. By total losses attributed unused waste heat of coolant, as well as costs due to leaks and mode of working chambers. In order to reduce energy consumption are analyzed and studied heat loss ways to reduce them. It was found that the losses can be reduced through the use of waste after drying coolant heating the dried drying agent and syrup.

Ключевые слова: ресурсосберегающая технология, яблоки, чипсы, тепловой анализ

Keywords: resource-saving technology, apples, chips, thermal analysis

Известное оборудование для переработки плодовоовощного сырья отличается низкой тепловой эффективностью и степенью использования потенциала теплоносителя, высокими удельными энергетическими затратами на единицу высушенного продукта [1, 2].

Цель работы состояла в тепловом анализе влаготепловых процессов созданной ресурсосберегающей технологической схемы линии производства фруктовых яблочных чипсов.

Данная работа связана с расчетом тепловых затрат контрольных поверхностей энерго-

технологической системы (ЭТС) и их анализом для машинно-аппаратурной схемы линии производства фруктовых яблочных чипсов и получения сушеных плодов высокого качества.

Решение данной задачи основывается на исследованиях влаготепловой обработки растительного сырья (яблоки, груши, морковь) с использованием комбинированных способов влаготеплового воздействия, реализующих осциллированную обработку плодов и овощей в установке рециркуляционного типа [3].

На основании проведенных экспериментальных исследований и полученных теоретических данных была разработана ресурсосберегающая машинно-аппаратурная схема линии производства яблочных чипсов с обеспечением готовых сушеных продуктов высокой пищевой ценности при сокращении энергозатрат [3, 4].

Сравнительный анализ тепловых затрат теплообменных процессов и машинно-аппаратурных схем технологических линий произведен на основе составленной методики расчета с использованием в качестве показателей теплового КПД и величины удельной теплоты на единицу исходного сырья на основе полезной работы по преобразованию продукта и использования отработанного теплоносителя.

Тепловой КПД предлагаемой аппаратурно-технологической схемы производства яблочных чипсов на основе комбинированной конвективно-СВЧ-сушки составляет $\eta_T = 98,72\%$ и превышает аналогичный показатель известных технологий (базовый вариант при полном использовании пара – $\eta_T = 86,45\%$), что показывает преимущество разработанной технологии (рисунок 1) [2].

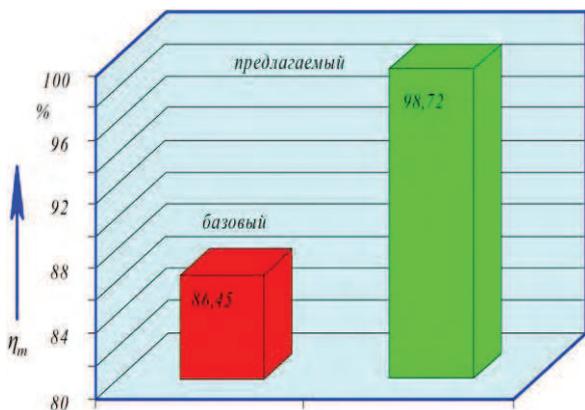


Рисунок 1. Тепловой КПД η_T базового и предлагаемого вариантов линии производства яблочных чипсов

Следовательно, возможно сделать вывод о повышении степени термодинамического совершенства предлагаемой ЭТС за счет использования отработанных теплоносителей и организации работы системы в замкнутом цикле.

Повышению теплового кпд сушки способствует применение рециркуляции теплоносителя и использование теплоты вторичного пара на различных технологических стадиях. Например, массовая доля отработанного теплоносителя, полезно используемого и направляемого на подогрев теплоносителя, исходного сырья и нагрев сиропа при обработке яблок, равна 482 кг, что соответствует 95,7 % от требуемой теплоты для ЭТС.

Повышение теплового КПД предлагаемой технологии обусловлено также применением теплообменников с конденсатором для поступенчатого подогрева осушенного теплоносителя. При этом полезно используется менее 1 % пара испарившейся влаги, что оставляет возможность для дальнейшего совершенствования энерготехнологической системы.

Массовая доля теплоты с теплоносителем для конвективной сушки продукта в рециркуляционном контуре обладает наибольшей теплотой и составляет 99,97 % от суммарного прихода теплоты в контрольную поверхность ЭТС или 494656,82 кДж/кг (таблица 1).

Наибольшую теплоту продукт имеет после конвективной сушки, например, для яблок сорта «Антоновка» - 147,1 кДж/кг или составляет 21,28 % от суммарной теплоты, подведенной к контрольной поверхности с учетом затраченной электроэнергии. Это объясняется высокой температурой и влажностью высушиваемого продукта.

Возрастание теплового КПД в процессе сушки яблок в большей степени связано с наличием циркуляции теплоносителя на сушке и незначительно определяется термодинамическими показателями продукта.

Т а б л и ц а 1

Тепловые балансы контрольной поверхности (D) конвективной сушки с вентилятором подачи пара

Наименование	Обозн	Теплота	
		Теплота на 1 кг начального продукта кДж/кг	Теплота в % от поступающей в контр. поверхность
1	2	3	4
Приход			
Подогретый начальный продукт	$q_{D1н}$	147,1	0,03
Перегретый пар	$q_{D3н}$	494656,82	99,97
Сумма теплоты, подведенной к контрольной поверхности	$\sum q_{Dн}$	494803,92	100

1	2	3	4
Расход			
Подсушенный продукт	$q_{D1к}$	150,5	0,03
Перегретый пар	$q_{D3к}$	493183,5	99,67
Пары испарившейся влаги	$q'_{D3к}$	1456,18	0,25
Внешние потери в окружающую среду	q_{Doc}	13,74	0,01
Сумма теплоты, отведенной от контрольной поверхности	$\sum q_{Dк}$	494803,92	100
Полезно используемый пар испарившейся влаги	Δq	503,007	-
Тепловой КПД $\eta_{DT}=99,8\%$			

Величина удельной теплоты подсушенного продукта после конвективной сушки составляет 150,5 кДж/кг (0,03 %) и теплоносителя – 493183,5 кДж/кг (99,67 %), что тре-

бует сосредоточить значительное внимание при проектировании конструкции на рациональном использовании энергетического потенциала отработанного теплоносителя.

Т а б л и ц а 2

Тепловые балансы предварительной (Е) и завершающей (G) СВЧ - сушки

Наименование	Обозн	Контрольная поверхность Е		Контрольная поверхность G	
		Теплота на 1 кг начального продукта кДж/кг	Теплота в % от поступающей в контр. поверхность	Теплота на 1 кг начального продукта кДж/кг	Теплота в % от поступающей в контр. поверхность
Приход					
Подсушенный продукт	$q_{1н}$	150,5	10,33	21,8586	6,51
Подогретый теплоноситель	$q_{3н}$	1274,33	87,44	312,8032	93,12
Электроэнергия колебательной мощности магнетронов сети	$q_{6н}$	32,47	2,23	1,2634	0,37
Сумма теплоты, подведенных к контрольным поверхностям	$\sum q_n$	1457,3	100	335,9253	100
Расход					
Конечный продукт	$q_{1к}$	19,78	1,36	15,6766	4,66
Теплоноситель с испарившейся влагой	$q_{3к}$	1421,92	97,57	310,1862	92,34
Внешние потери в окружающую среду	q_{oc}	15,6	1,07	10,0625	3,0
Сумма теплоты, отведенной от контрольных поверхностей	$\sum q_k$	1457,3	100	335,9253	100
Тепловой КПД, %	η_T	98,93 %		97,0 %	

Тепловые потоки на выходе из контрольной поверхности предварительной СВЧ-сушки яблок имеют величину удельной теплоты высушенного продукта 19,78 кДж/кг (1,36 %), теплоносителя 1421,92 кДж/кг (97,57 %), потери в окружающую среду 15,6 кДж/кг (1,07 %).

Несмотря на дальнейшее снижение температуры продукта в процессе сушки (до $T_c=303$ K) его теплота незначительно снижается до 15,67 кДж/кг (таблица 2). Вместе с тем анализ тепловых потерь в процессах подогрева сырья, конвективной сушки и СВЧ-сушки с

промежуточной обработкой сиропом показывает, что они не превышают 3,5 % (рисунок 2).

Ресурсосберегающая технологическая схема с замкнутым циклом использования теплоносителя отличается достаточно высокой эффективностью применения тепловых потоков, например, при подогреве сиропа тепловой КПД составляет 0,21; в процессе промежуточной обработкой сиропом около 0,98; нагрева осушенного теплоносителя 0,89; предварительной и завершающей СВЧ-сушки, соответственно, 0,98 и 0,97.

Для повышения теплового КПД аппаратно-технологических схем производства фруктовых и овощных чипсов (концентратов) эффективно применять энергетические потоки с высокими термодинамическими показателями.

Однако при этом накладываются ограничения, обусловленные влиянием температуры теплоносителя на осуществление отдельных стадий схемы и, как следствие, на качество готового продукта.

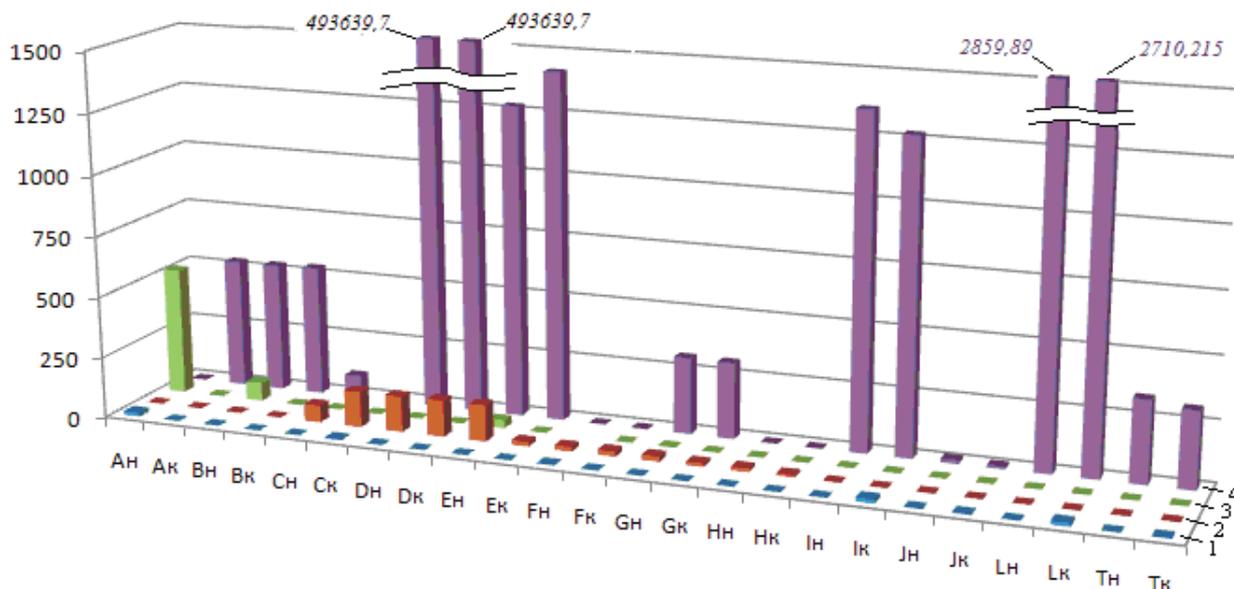


Рисунок 2. Диаграмма входных и выходных тепловых потоков предлагаемой технологической схемы линии производства яблочных чипсов с контрольными поверхностями: А – парогенератора, В – пароперегревателя, С – предварительного подогрева сырья, Д – конвективной сушики, Е – предварительной СВЧ-сушки, F – обработки водным раствором, G – завершающей СВЧ-сушки, Н – охлаждения готового продукта, J – подогрева водного раствора, L – теплообменника 1 ступени с конденсатором для подогрева осушенного теплоносителя, I – теплообменника 2 ступени нагрева осушенного теплоносителя
1 – жидкая фаза (конденсат, сироп); 2 – обрабатываемый продукт; 3 – электроэнергия; 4 – теплоноситель

Из рассмотрения тепловых потоков (рисунок 2) следует, что наибольшие потери теплоты наблюдаются в пароперегревателе (В) и составляют 65,36 кДж/кг.

Внешние тепловые потери в контрольных поверхностях конвективной, предварительной и завершающей СВЧ-сушки составляют, соответственно, 13,74 кДж/кг, 15,6 кДж/кг и 10,06 кДж/кг. Это объясняется образованием избыточного количества теплоты за счет испаренной влаги и достаточно большими потерями теплоты в окружающую среду при сушке продукта.

Приход теплоты на стадиях предварительной и завершающей СВЧ-сушки составляет не более 4 % суммарной теплоты ЭТС и основное потребление теплоты при производстве фруктовых яблочных чипсов происходит контрольной поверхностью блока конвективной сушилки. Для испарения влаги в контрольной поверхности предварительной СВЧ-сушки затрачивается 27,7 % теплоты от суммарного количества, подведенной к контрольной поверхности (Е).

Наибольшие тепловые потоки принадлежат теплоносителю, они во много раз превышают теплоту начального и готового про-

дуктов. Как следует из тепловых балансов (таблицы 1 и 2) приход теплоты в контрольные поверхности обусловлен потоком теплоносителя и основное потребление теплоты при переработке сырья происходит на стадии сушики. Поэтому использование теплоты после сушики имеет очень большое значение.

Следует отметить, что с понижением влажности пластин яблок происходит уменьшение коэффициента диэлектрических потерь, что приводит к снижению количества теплоты, генерируемой в продукте. Увеличение подводимой СВЧ-мощности способствует увеличению КПД процесса трансформации СВЧ-энергии. В процессе экспериментального исследования сушики яблок за счет электромагнитной энергии данный КПД составлял 83 %.

В процессе сушики СВЧ-энергия позволяет в значительной степени интенсифицировать тепломассообмен, однако, чрезмерное увеличение подводимой СВЧ-мощности может привести к возникновению большого градиента влагосодержания, и, как следствие, образованию трещин и нарушению структуры пластин яблок.

В результате расчетов определены полезные расходы теплоты и его потери в зависимости от технологических процессов и конструкции оборудования различных схем. Полезные расходы включают теплоту, затрачиваемую на нагрев продукта (Q_1) и преобразование продукта (Q_2). К суммарным потерям отнесены теплота неиспользованного отработанного теплоносителя (Q_3), а также затраты вследствие различных неплотностей и негерметичности (Q_4), режима работы рабочих камер (Q_5). В результате расчетов полезная теплота известных схем составляет не более 9-15 % от общего прихода теплоты, а по предлагаемой технологии составляет 84 %.

С целью снижения энергозатрат выполнен анализ потерь теплоты и исследованы пути их снижения. Выяснено, что потери по группе Q_3 могут быть сокращены за счет использования отработанного после сушки теплоносителя на подогреве осушенного сушильного агента и сиропа.

ЛИТЕРАТУРА

1 Рогов И.А., Некрутман С.В. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов. М.: Агропромиздат, 1986. 351 с.

2 Калашников Г.В., Литвинов Е.В. Оценка тепловой эффективности технологической схемы производства яблочных чипсов и сушеных плодов // Вестник ВГУИТ. № 3. 2014. С. 43–49.

3 Калашников Г.В., Литвинов Е.В. Кинетика СВЧ–сушки яблок // Вестник ВГУИТ. № 2 (52). 2012. С. 40–42.

4 Калашников Г.В., Литвинов Е.В. Анализ свойств яблок различных сортов на основе термоаналитических методов // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 11. С. 28–31.

5 Пат. № 2483571, RU, А 23 L 01/025, А 23 L 1/064. Тороидальный аппарат для производства плодоовощных чипсов / Калашников Г.В., Литвинов Е.В. № 2012100586/12; Заявл. 10.01.2012; Оpubл. 10.06.2013; Бюлл. № 16.

6 Пат. № 2485803, RU, А 23 L 01/025, А 23 L 1/064. Линия для производства плодоовощных чипсов / Калашников Г.В., Литвинов Е.В. № 2012104280/12; Заявл. 07.02.2012; Оpubл. 27.06.2013; Бюлл. № 18.

Соотношения общих удельных затрат теплоты линий производства фруктовых чипсов на основе груш и других фруктов аналогичны яблочным чипсам и обладают идентичным характером распределения массовой доли теплоты для контрольных поверхностей технологических схем.

Анализ тепловых затрат влаготепловой обработки растительного сырья позволил определить наиболее энергоемкие технологические участки производства и предложить не только пути повышения эффективности использования теплоносителя, но и конструктивное оформление процессов [5-6].

Обозначения:

индексы: 1,2,3 – соответственно, для твердой (дисперсной), жидкой и паровой фаз; "ос" – потери в окружающую среду; "н" – начальное состояние; "к" – начальное состояние.

REFERENCES

1 Rogov I.A., Nekrutman S.V. Sverkhvysokochastotnyi nagrev pishchevykh produktov [Superhigh heating foods]. Moscow, Agropromizdat, 1986. 351 p. (In Russ.).

2 Kalashnikov G.V., Litvinov E.V. Evaluation of thermal efficiency of the technological scheme of apple chips and dried fruits production. Vestnik VGUIT. [Bulletin of VSUET], 2014, no. 3, pp. 43-49. (In Russ.).

3 Kalashnikov G.V., Litvinov E.V. Microwave drying kinetics of apples. Vestnik VGUIT. [Bulletin of VSUET], 2012, № 2 (52). pp. 40-42. (In Russ.).

4 Kalashnikov G.V., Litvinov E.V. Analysis of the properties of apples of different varieties on the basis of thermoanalytical methods. Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya. [Storage and processing of agricultural raw materials], 2012, № 11, pp. 28-31. (In Russ.).

5 Kalashnikov G.V., Litvinov E.V. Toroidal'nyi apparat dlia proizvodstva plodoovoshchnykh chipsov [Toroidal apparatus for the production of fruit and vegetable crisps]. Patent RF, no. 2483571, 2012. (In Russ.).

6 Kalashnikov G.V., Litvinov E.V. Liniia dlia proizvodstva plodoovoshchnykh chipsov [Line for the production of fruit and vegetable crisps]. Patent RF, no. 2485803, 2012. (In Russ.).