

Тогда, число Био для задачи (рис.8) запишется так:

$$Bi = \frac{R_k}{R_d} = \frac{\alpha_k}{\lambda_d} 2(L + \delta)(B + \delta) \left(\frac{\delta_d}{2LB} - \frac{\delta_d}{L\delta + 2(B + \delta)} \right) \quad (33)$$

Таким образом, могут быть определены задачи и методы экспериментального моделирования процессов вымораживания.

Выводы.

3. Перспективным путем разделения пищевых растворов являются принципы криоконцентрирования. В отличие от схем объемной кристаллизации, в аппаратах блочного вымораживания обеспечивается эффект направленной кристаллизации, что способствует формированию твердой фазы с плотной упаковкой кристаллов льда.

4. Конструкции аппаратов блочного вымораживания имеют резервы для совершенствования, повышения интенсивности массопереноса при кристаллизации, роста производительности и снижения энергоемкости. Разработана математическая модель кинетики и энергетике процесса кристаллизации в аппаратах вымораживания. На основе методов теории подобия нестационарная трехмерная модель направленной кристаллизации приведена к форме, удобной для инженерных расчетов.

Литература.

1. Бурдо О.Г. Холодильные технологии в системе АПК – Одесса: Полиграф, 2009 – 288с.
2. Бурдо О.Г., Милинчук С.И., Мордынский В.П., Харенко Д.А. Техника блочного вымораживания – Одесса: Полиграф, 2011 – 294с.
3. Гунько П.А. Исследование и разработка технологии извлечения белковых компонентов из творожной сыворотки низкотемпературными методами. /дис. к.т.н., 2014, Кемерово 2014 Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности» (ФГБОУ ВПО «КемТИПП»).
4. Мальцева О.М. Моделирование процесса намораживания льда на цилиндрической поверхности емкостного криоконцентратора // Техника и технология пищевых производств. 2016. Т. 42. № 3 с.118-123 / ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности
5. Овсянников В.Ю., Краминова Ю.С., Кириченко Т.С., Москаленко А.С. Методика определения оптимального температурного режима в кристаллизаторах-криоконцентраторах // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 3-1. – С. 43-44; URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14704> (дата обращения: 01.01.2017).
6. Бостынец Н.И., Овсянников В.Ю. Исследования и разработка установки для криоконцентрирования вишневого сока.

УДК66.047.55.086.2-035.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОВОЛНОВОЙ ЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛКИ

Бурдо О.Г., Маренченко Е.И., Пилипенко Е.А., Балагура В.В.

MATHEMATICAL MODEL OF MICROWAVE BAND DRYER

Burdo O.G., Marenchenko E.I., Pilipenko E.A., Balagura V.V.

Abstract. The prospects of electromagnetic energy supply technologies for drying food products are shown. The scheme of belt dryer with infrared and microwave energy generators is considered. The hardware-processor circuit, the physical and parametric model of the dryer are presented. On the basis of the phenomenological approach, a mathematical model of the drying process in an electromagnetic field is compiled.

Аннотация. Показаны перспективы электромагнитных технологий подвода энергии при сушке пищевых продуктов. Рассмотрена схема ленточной сушилки с инфракрасными и микроволновыми генераторами энергии. Приведены аппаратурно-процессовая схема, физическая и параметрическая

модель сушилки. На основе феноменологического подхода составлена математическая модель процесса сушки в электромагнитном поле.

Введение. Ленточная СВЧ и ИК сушилка – это инновационное решение для сушки дисперсных зерновых материалов и плодов ягод, фруктов и овощей. Благодаря комбинации СВЧ и ИК излучения появляется возможность существенно сократить время процесса сушки, его энергоёмкость, улучшить качество и сохранить структуру высушенного продукта.

СВЧ излучение, проникая в глубину продукта, влияет на биполярные молекулы воды, приводя их в движение. В следствии этого движения, молекулы воды сталкиваются и трутся друг о друга, производя тепловую энергию. При повышении температуры влага в продукте расширяется, происходит парообразование, создается давление внутри продукта, влага стремится к поверхности продукта.

ИК излучение действует на поверхность продукта, удаляя влагу, которая была доставлена СВЧ излучением из глубины продукта.

Данный метод сушки минует фазу прогрева теплоносителя, действуя непосредственно на влагу в глубине продукта благодаря электромагнитному полю, что позволяет максимально сократить потери энергии в окружающую среду и на нагрев продукта (так как электромагнитное поле греет непосредственно воду внутри продукта).

В период сушки, температура продукта не превышает допустимых норм термической обработки продуктов питания, что так же положительно сказывается на внешнем виде высушенного продукта.

Схема микроволновой ленточной сушилки в электромагнитном поле

СВЧ и ИК сушилка (рис. 1) состоит бункера загрузки – 1, через который сырой продукт поступает на ленточный конвейер – 2, приводимый в движение приводом – 3, далее продукт продвигается к модулю СВЧ – 4 и модулю ИК – 5, на технологической линии размещено по три модуля, далее высушенный продукт выгружается в бункер выгрузки – 6. СВЧ модуль состоит из магнетрона – 7, вентилятора – 8, высоковольтного трансформатора – 9 и компрессора – 10. ИК модуль состоит из ИК излучателя – 11. При помощи панели управления – 12 происходит настройка подводимой мощности СВЧ излучения – 13, время работы СВЧ модуля устанавливается на 10 минут, 1 минуту и 10 секунд при помощи кнопок – 14, 15, 16 соответственно, данные настроек мощности и времени выводятся на аналоговый датчик – 17, модуль приводится в действие кнопкой «пуск/стоп» - 18. На механическом датчике – 19 отображается мощность ИК излучения, регулируемая при помощи переключателя мощности – 20. Корпус установки – 21 покрыт изоляцией – 22.

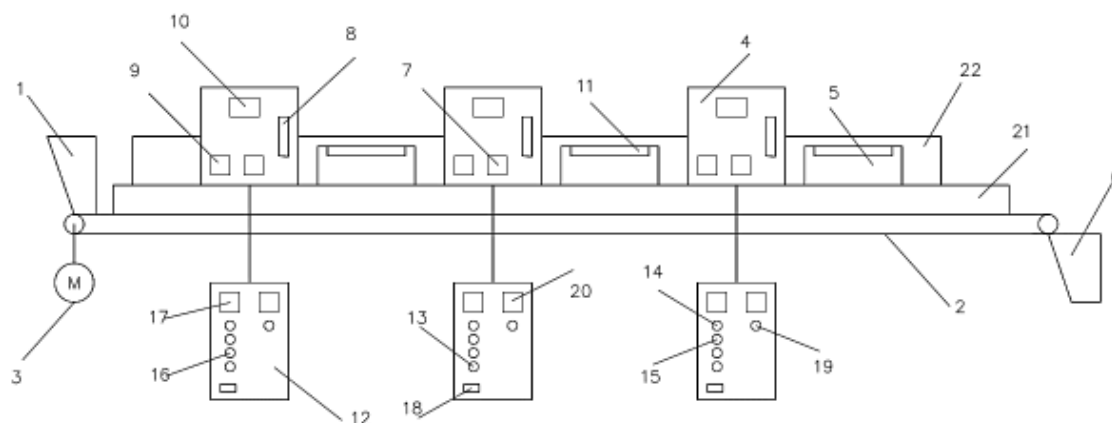


Рис. 1. Схема СВЧ и ИК экспериментальной сушилки

Для моделирования сложной микроволновой ленточной сушилки в электромагнитном поле проведем ее декомпозицию.

Аппаратурно-процессная схема ленточной сушилки в электромагнитном поле (рис. 2) состоит из трех микроволновых и трех инфракрасных модулей.

Аппаратурно-процессная схема ленточной сушилки

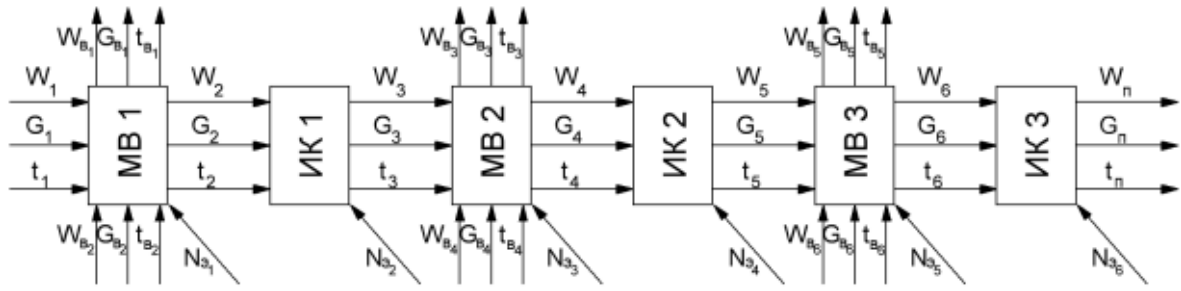


Рис. 2. Аппаратурно-процессовая схема конвейерной сушилки

G_B – расход воздуха, кг/с ; W_B – влажность воздуха, %; t_B – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$;
 G_1 – расход сырья, кг/с ; W_1 – влажность сырья, %; t_1 – температура сырья, $^{\circ}\text{C}$;
 G_n – расход продукта, кг/с ; W_n – влажность продукта, %; t_n – температура продукта, $^{\circ}\text{C}$

Рассмотрим подробнее модули MB1 и ИК1. Продукт проходит через микроволновой модуль MB1 и благодаря электромагнитному излучению $N_{\text{с}1}$ происходит процесс дипольного нагрева влаги в начальном объеме продукта G_1 , влага в продукте W_1 испаряется из внутреннего объема продукта стремясь к поверхности, при этом прогревая продукт изменяя его начальную температуру t_1 . Система вентиляции MB1 модуля создает поток воздуха $G_{\text{в}1}$ который удаляет испаренную влагу с поверхности продукта изменяя начальную влажность воздуха $W_{\text{в}1}$, при этом, так же, прогревая его температуру $t_{\text{в}1}$.

Далее продукт проходит к модулю инфракрасного облучения ИК1, где благодаря подводу электромагнитной энергии $N_{\text{с}2}$ происходит процесс удаления влаги W_2 с поверхности объема продукта G_2 , при этом изменяя температуру продукта t_2 .

Аппаратурно-процессная схема ленточной сушилки позволяет перейти к более детальному рассмотрению модели протекающего процесса и параметров, влияющих на него, что позволяет перейти к параметрической модели процесса сушки в электромагнитном поле.

Параметрическая модель ленточной сушилки в электромагнитном поле (рис. 3) включает в себя параметры сырья, технические параметры установки и режимные параметры подвода электромагнитной энергии, которые влияют на показатели удельных затрат энергии на килограмм удаленной влаги – j , Дж/кг.уд.вл. и конечную влажность материала – W_k , %.

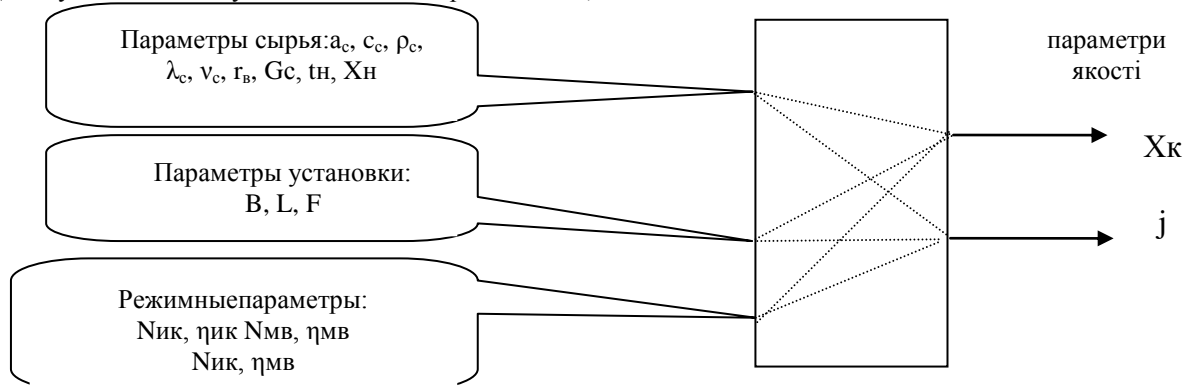


Рис. 3. Параметрическая модель конвейерной сушилки

$N_{\text{э}}$ – электрическая энергия, Вт , F – площадь поверхности, м^2 ; δ – толщина слоя, м

$u_{\text{в}}$ – скорость воздуха, м/с ; $u_{\text{л}}$ – скорость ленты, м/с

j – удельные затраты на килограмм удаленной влаги, Дж/кг

После рассмотрения аппаратно-процессовой и параметрической схем необходимо составить физическую схему (рис. 4). Поскольку тепловой поток и переносимая им влага распространяются

преимущественно по координате z – математическое моделирование в дальнейшем следует рассматривать как одномерную.

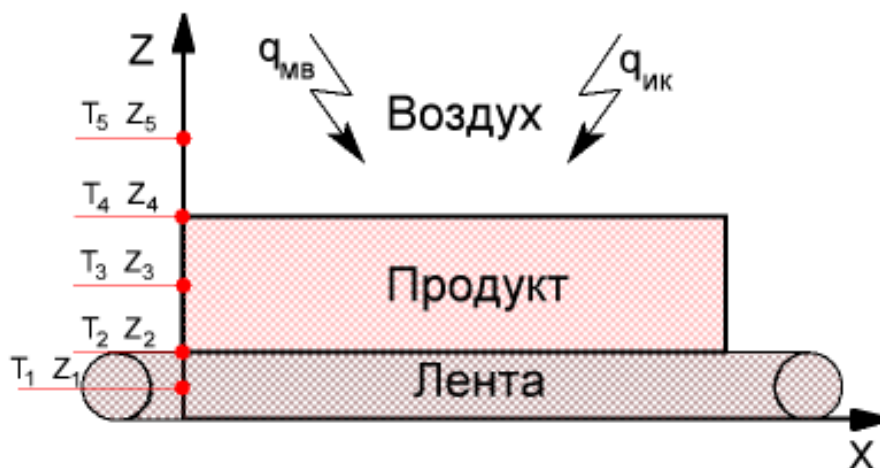


Рис. 4. Физическая схема конвейерной сушилки

Рассмотрим процесс теплообмена относительно одной оси (Z). Следовательно, уравнения, описывающие протекающие процессы, также будут рассмотрены относительно одной оси.

Запишем уравнения, описывающие протекающие процессы.

1) При $Z > Z_4$:

В этой области находится воздушный поток, который взаимодействует с продуктом не как теплоноситель, а как средство переноса испаренной из продукта влаги в окружающую среду.

В математическом моделировании процесса сушки необходимо составить основное в гидродинамических процессах дифференциальное уравнение Навье-Стокса которое, к сожалению, не является решенным по сегодняшний день.

- Уравнение Навье - Стокса:

$$\rho_B * \omega_B * \frac{\partial \omega_B}{\partial z} = \rho_B * g - \frac{\partial P_B}{\partial z} + \mu_B * \frac{\partial^2 \omega_B}{\partial z^2} \quad (1)$$

Так же, одно из основных аэро- и гидродинамических уравнений, выражающее в дифференциальной форме закон сохранения энергии.

- Уравнение энергии:

$$\frac{\partial t_B}{\partial \tau} = \alpha_B * \frac{\partial^2 t_B}{\partial z^2} + \frac{qV}{C_v \rho_B} \quad (2)$$

Так как внутренних источников тепловыделения нет, то составляющей $\frac{qV}{C_v \rho_B}$ можно пренебречь:

$$\frac{\partial t_B}{\partial \tau} = \alpha_B * \frac{\partial^2 t_B}{\partial z^2} \quad (3)$$

Кроме того, в процессе сушки неотъемлемой частью является дифференциальное уравнение сплошности которое отображает закон сохранения массы [4].

- Уравнение сплошности:

$$\frac{1}{\rho_B} * \frac{\partial \rho_B}{\partial t_B} + \frac{\partial \omega_B}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

2) При $Z = Z_4$:

Процессы протекающие в этой области заключаются в взаимодействии электромагнитного излучения с поверхностью продукта, и поверхности продукта с воздухом.

- Граничные условия II рода:

В этом случае заданной является величина плотности теплового потока для каждой точки поверхности тела в любой момент времени. В случае с подводом электромагнитной энергии плотность теплового потока в любой момент времени будет неизменной [1].

$$\begin{aligned} q_{ик} &= const \\ q_{мв} &= const \end{aligned}$$

- Граничные условия III рода:

В этом случае задаются температуры среды t_0 и условия теплообмена этой среды с поверхностью продукта [1].

$$\frac{\partial t_{п}}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_{п}}{\lambda_{п}}(t_{ст} - t_0) \quad (5)$$

- 3) При $Z_4 < Z < Z_2$:

В данной области процессы происходят внутри продукта, а именно воздействие электромагнитного поля на биполярные молекулы воды в нем, в следствии чего происходит нагрев воды и последующее удаление ее из центра продукта в его поверхности.

- Уравнение энергии:

$$\frac{\partial t_{п}}{\partial \tau} = \alpha_{п} * \frac{\partial^2 t_{п}}{\partial z^2} + \frac{q_{икV}}{C_v \rho_{п}} + \frac{q_{мвV}}{C_v \rho_{п}} \quad (6)$$

- 4) При $Z = Z_2$:

Происходит взаимодействие поверхности продукта с поверхностью ленты в следствии чего происходит теплообмен между продуктом и лентой.

Граничные условия IV рода:

Формулируются на основе равенства тепловых потоков, проходящих через поверхность соприкосновения тел [1].

$$\lambda_{п} \frac{\partial t_{п}}{\partial n} \Big|_{ст1} = \lambda_{к} \frac{\partial t_{к}}{\partial n} \Big|_{ст2} \quad (7)$$

- 5) При $Z = Z_1$:

Процессы протекают в самой ленте.

- Уравнение Навье - Стокса:

$$\rho_{к} * \omega_{к} * \frac{\partial \omega_{к}}{\partial z} = \rho_{к} * g - \frac{\partial P_{к}}{\partial z} + \mu_{к} * \frac{\partial^2 \omega_{к}}{\partial z^2} \quad (8)$$

- Уравнение энергии:

$$\frac{\partial t_{к}}{\partial \tau} = \alpha_{к} * \frac{\partial^2 t_{к}}{\partial z^2} \quad (9)$$

- Уравнение сплошности:

$$\frac{1}{\rho_{к}} * \frac{\partial \rho_{к}}{\partial t} + \frac{\partial \omega_{к}}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

Так же следует записать уравнения связи описывающие физические свойства элементов

Уравнения связи для каждой среды:

- Теплофизические свойства воздуха при $t = -50 \dots 150^\circ\text{C}$ и $P = 0,101\text{МПа}$: (11)

$$\rho_B = 1.292 - 0.452 \cdot 10^{-2} \cdot t + 0.106 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 \quad (12)$$

$$c_B = 1.005 - 0.257 \cdot 10^{-4} \cdot t + 7.14 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \quad (13)$$

$$\lambda_B \cdot 10^2 = 2.44 + 0.786 \cdot 10^{-2} \cdot t - 2.54 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \quad (14)$$

$$\nu_B \cdot 10^6 = 13.27 + 8.80 \cdot 10^{-2} \cdot t + 1.11 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 \quad (15)$$

$$\mu_B = \nu_B \cdot \rho_B$$

$$Pr = \frac{\mu_B \cdot c_B}{\lambda_B} \quad (16)$$

- Теплофизические свойства яблок при $t = 20^\circ\text{C}$: (17)

$$\lambda = 0.49 \dots 0.51 \quad (18)$$

$$\alpha \cdot 10^8 = 14.6 \dots 16.0 \quad (19)$$

Запишем начальные условия при $\tau = 0$: (20)

$$T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_{oc} \quad (21)$$

$$W_{я} = 85\% \quad (22)$$

$$T_{я} = T_{oc}$$

$$q_{ик} = q_{мв} = 0$$

Система уравнений (1-22) с записанными граничными, теплофизическими и начальными условиями является нестационарной одномерной моделью разработанной сушильной установки с электромагнитным подводом энергии.

Проблема практической реализации модели заключается в том, что необходимо решение уравнения Навье-Стокса, в настоящее время возможности решения которого нет.

Принятый путь решения подобной задачи – это привлечение методов теории подобия [3].

Для того, чтобы найти адекватные модели происходящих процессов нужно провести следующий анализ:

- 1) Для каждой зоны, которая анализируется определить сущность физических явлений;
- 2) Установить в каком режиме происходит тепловое воздействие;
- 3) Какое влияние может оказать конструкция разработанной установки.

Теплоотдача при вынужденной конвекции может быть в ламинарном или турбулентном режиме.

Важная задача привести объект к геометрической форме. Корректно слой продукта представить в виде пластины, в которой имеет место нестационарная теплопроводность [2]. Такая задача моделируется с помощью числа Фурье.

На первом этапе рассмотрим моделирование задачи на ленточной сушилке по традиционному конвективному подводу энергии.

С учетом этих положений составлена таблица 1.

Табл. 1. Процессы, протекающие в сушилке и соответствующие им модели в процессе традиционной сушки

Процесс	Режим	Геометрические условия	Модель
Теплоотдача (вынужденная конвекция)	Ламинарный режим	Пластина	$\overline{Nu}_{f,l} = 0.76 \cdot Ra_{f,l}^{0.25} \cdot \varepsilon_t$
Теплоотдача (вынужденная конвекция)	Турбулентный режим	Пластина	$\overline{Nu}_{s,d} = 0.021 \cdot Re_{s,d}^{0.8} \cdot Pr_s^{0.43} \cdot \varepsilon_d \cdot \varepsilon_t$

Нестационарная теплопроводность	-----	Пластина	$Fo = f(Bi; \theta)$ $\tau = \frac{Fo * l^2}{\alpha_n}$
---------------------------------	-------	----------	---

Модель предлагаемого инновационного варианта ленточной сушилки в электромагнитном поле имеет отличия (таблица 2).

Табл. 2. Процессы, протекающие в сушилке и соответствующие им модели в процессе инновационной сушки в электромагнитном поле.

Процесс	Режим	Геометрические условия	Модель
Теплопроводность	нестационарный	Пластина	$T_k = T_n + \frac{1}{c_n * G_n} * (q_{ик} + q_{мв})$ $\tau = \frac{(T_k - T_n) c_n * m_n}{q_{ик} + q_{мв}}$

После нахождения адекватных моделей происходящих процессов рассмотрим систему расчета времени протекания процесса при инновационной ленточной сушке в электромагнитном поле, теплофизических параметров воздуха, коэффициента теплоотдачи от продукта и время протекания процесса сушки.

Для расчета времени сушки приведена блок-схема (рис. 5). Начальные данные берутся по теплофизическим свойствам продукта, мощности подводимой микроволновой энергии и конструктивным особенностям ленточной сушилки. Далее необходимо определить теплофизические свойства воздуха, рассчитать коэффициент теплоотдачи, число Фурье и скорость движения ленты.

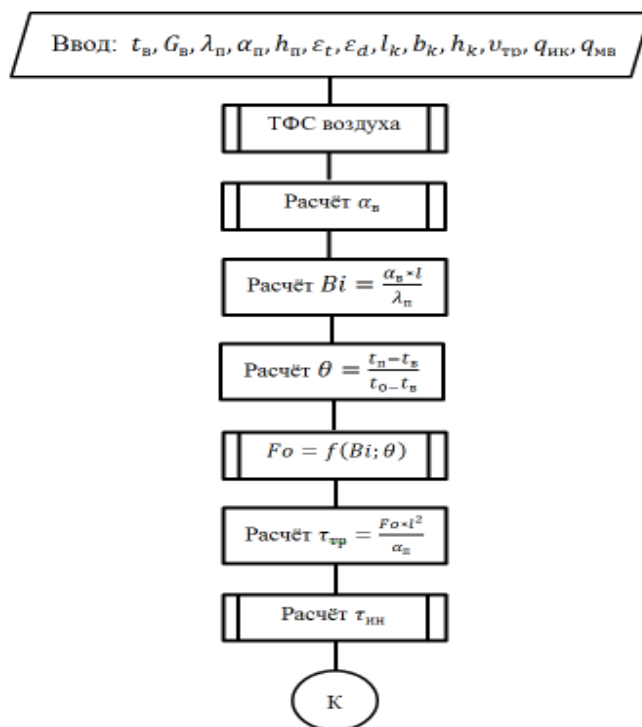


Рис. 5. Блок – схема расчёта модульной микроволновой ленточной сушилки

Для расчета теплофизических свойств воздуха приведена блок-схема (рис. 6), позволяющая нам определить теплоемкость, плотность, теплопроводность, скорость и вязкость воздуха. Следовательно, зная теплофизические свойства воздуха, определяем число Прандтля.

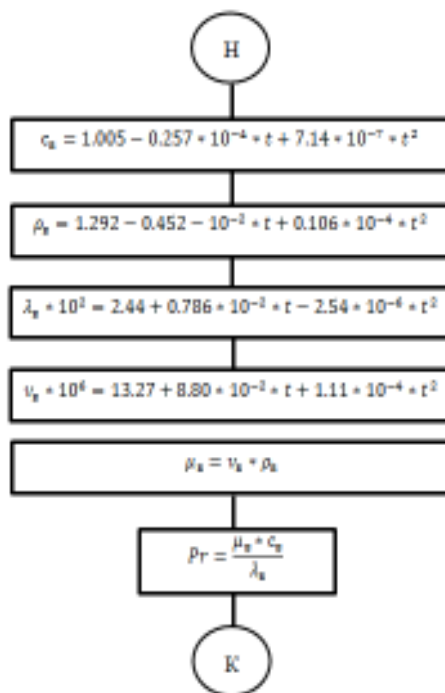


Рис. 6. Блок – схема расчёта ТФС воздуха

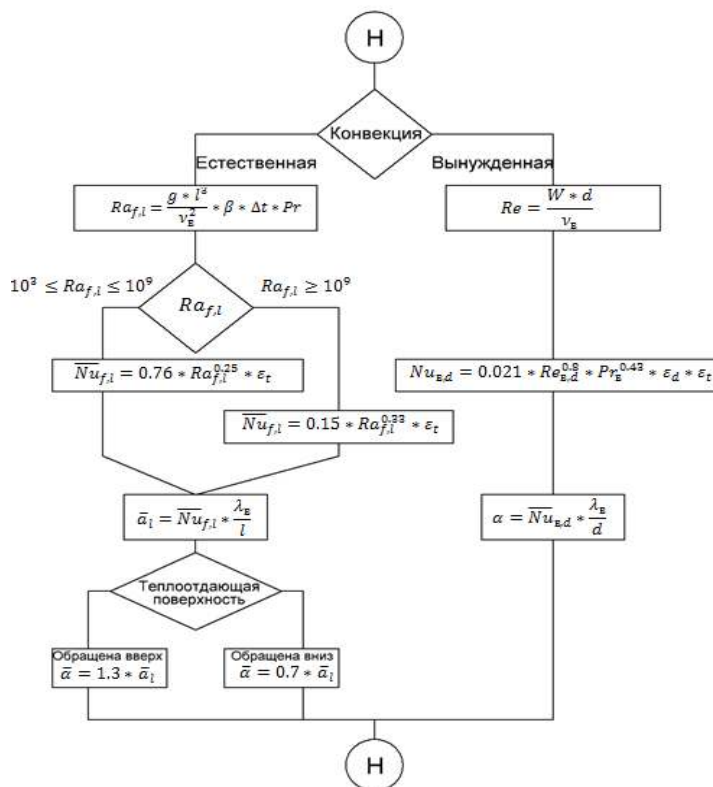


Рис. 7. Блок – схема расчёта коэффициента теплоотдачи к продукту

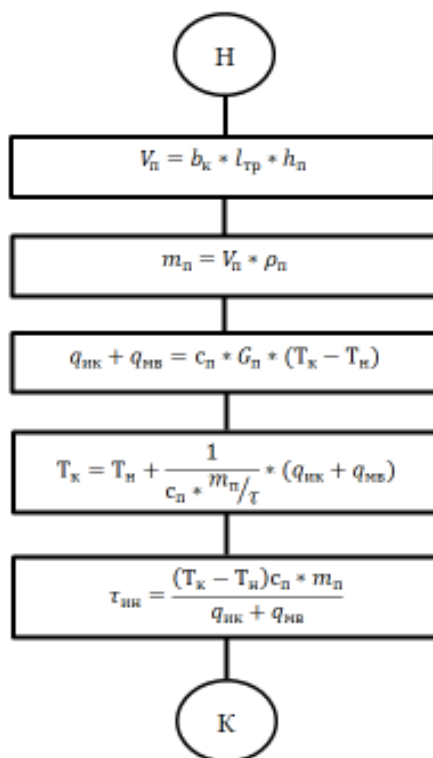


Рис. 9. Блок – схема расчёта времени протекания процесса при не нулевых $q_{нк}$, $q_{мв}$

Следующим шагом будет определение коэффициента теплоотдачи к продукту (рис. 7). В соответствии с числом Рейнольдса выбирается соответствующие критериальные уравнения и определяется число Нусельта.

Далее необходима диаграмма для определения числа [Фурье](#)

Полученные значения коэффициента теплоотдачи используются для расчета числа Bi . В дальнейшем определяется число Фурье и время процесса.

Расчет времени процесса в инновационной ленточной сушилке в электромагнитном поле проводится в соответствии с блок-схемой (рис. 8).

Исходными параметрами для расчета являются подводимая мощность, скорость ленты, теплофизические свойства продукта и воздуха, расход продукта.

Кинетика процесса сушки в инновационной ленточной электромагнитной сушилке должен быть подтвержден экспериментально.

Вывод:

Инженерный расчет можно проводить по рекомендациям таблицы 2, однако строгий расчет сушки должен проводиться с учетом рекомендаций таблицы 1.

Погрешность, которая возникает при пренебрежении указанных процессов очевидно зависит от сочетания конструктивных параметров и должна быть определена результатом постановки специальных исследований.

Литература

1. Бурдо О.Г., Калинин Л.Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах: Учебник. – Одесса: Друк, 2008. – 348 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967, 400с.
3. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. 2-е изд. – М.: Высш. Шк., 1973. – 296 с.