

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Барилевич В.А. Основы термогазодинамики двухфазных потоков и их численное решение: Учебное пособие. – СПб.: Изд. Политехнического университета, 2009. – 425 с.
2. Патент 15134 А Украина, МКИ F 28 С 1/00. Ежекційна градириня та способ її роботи / Кологри-вов М.М., Грандов А.А., Угольникова Н.П., Нянкина Е.Е., Серебрянский П.В. Одеська держ. акад. холоду – Заявл. 26.10.93, Опубл. 30.06.97, Бюл. № 3, видан 04.12.96 на 3стр.
3. Свидетельство 0555542 Ассоциационного комитета изобретений “Привилегия”. Абсорбционно-конденсационный метод и устройство для очистки потока и выделения из него компонентов / Кологривов М.М., Котенко С.В. - Приоритет 19.02.1993, Бюл. № 2, Москва, 1993.
4. Галустов В.С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
5. Пажи Д. Г., Галустов В. С. Основы техники распыливания жидкости. – М.: Химия, 1984. – 253 с.

УДК 519.6

**БОШКОВА И.Л., к.т.н., доцент, ГЕОРГИЕШ Е.В., ассистент,
КОЛЕСНИЧЕНКО Н.А., аспирантка**

Институт холода, криотехнологий и экоэнергетики имени проф. В.С. Мартыновского
Одесской национальной академии пищевых технологий

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ДВИЖУЩЕМСЯ ПЛОТНОМ СЛОЕ ПРИ МИКРОВОЛНОВО-КОНВЕКТИВНОМ И МИКРОВОЛНОВОМ НАГРЕВЕ

Анализируются двухкомпонентные математические модели, описывающие тепломассоперенос в слое с внутренними источниками (стоками) теплоты, обусловленными действием микроволнового поля. Приведены результаты расчетов температур газового и твердого компонентов по высоте сушилки в зависимости от мощности магнетронов, коэффициента ослабления, скорости воздуха и слоя.

Ключевые слова: теплоперенос, моделирование, дисперсные среды, сушилка, микроволновой нагрев, скорость, газ, твердые частицы, температура.

Double-base mathematical models are analysed, describing heat and mass transfer in a layer with the internal sources (flows) of warmth, conditioned by the action of the microwave field. Results over of calculations of temperatures gas and hard components on the height of dryer depending on power of magnetrons, coefficient of weakening, speed of air and layer are brought.

Keywords: heat transfer, modeling, disperse medium, a dryer, a microwave heating rate, gas, particulate, temperature.

Математическому описанию процессов переноса теплоты и массы в слоях, фильтруемых газом или жидкостью, уделяется большое внимание. В общем случае такое описание не может быть выполнено на основании представлений механики сплошных сред вследствие макроскопической неоднородности дисперсных систем. Континуальное приближение правомерно лишь в случаях, когда структурный размер элементов дисперсной среды значительно меньше линейного масштаба изменения средних температур и концентраций [1,2]. Такое условие выполняется во многих интересных для практики задачах о тепломассопереносе в дисперсных средах. В связи с этим возникает необходимость формулировки уравнений сохранения теплоты и массы для континуумов, моделирующих компоненты системы либо систему в целом. Широкое распространение получили феноменологические однокомпонентные гомогенные модели, позволяющие получить аналитические решения различных задач теплопереноса. В таких моделях посту-

лируется равенство температур компонентов. Между тем, при определенных условиях (при протекании в слое реакций с большим тепловым эффектом, кратковременных нестационарных процессах, низкой интенсивности межкомпонентного теплообмена, высокой каркасной теплопроводности слоя) температуры компонентов могут существенно различаться. В таких случаях используют двухкомпонентные гомогенные модели, в которых слой рассматривается как система, состоящая из двух квазисплошных компонентов, между которыми протекают межкомпонентные процессы тепло- и массообмена (например, [3-7]. В [10] система уравнений теплопереноса для двухкомпонентных моделей сводилась к некоторому эквивалентному уравнению. Сопоставление одно- и двухкомпонентных моделей показало, что использование однокомпонентных моделей в кратковременных процессах, при интенсивном тепловыделении, высоком термическом сопротивлении межкомпонентного теплообмена приводит к существенным ошибкам в предсказании температур [8-10, 12-14]. Известные в литературе модели теплопереноса при наличии внутренних источников теплоты справедливы для свободного слоя, модели для слоя с погруженными поверхностями отсутствуют.

В данной работе рассматривается возможность применения двухкомпонентных математических моделей для описания тепломассопереноса в слое с внутренними источниками (стоками) теплоты, обусловленными действием микроволнового поля, при отсутствии погруженных поверхностей. На основании этих моделей получены аналитические зависимости для распределения температур компонентов продуваемого слоя с источниками теплоты и погруженными поверхностями, в движу-

щемся слое при кондуктивно-конвективной и микроволново-конвективной сушке.

В качестве объекта моделирования рассматривается сушилка, представляющая собой вертикальный канал, в который из загрузочного бункера поступает влажный дисперсный материал. В нижнем сечении канала расположено выпускное устройство, обеспечивающее движение материала в виде плотного слоя и его необходимый расход. В верхнем (входном) сечении канала размещены магнетроны, создающие заданный тепловой поток. Через это же сечение подается сушильный агент, который фильтруется сквозь слой и удаляется из нижнего (выходного) сечения. За счет поглощенной влажными частицами СВ энергии и теплоты, передаваемой ему от сушильного агента путем межкомпонентного теплообмена, происходит прогрев частиц и испарение влаги, высушенный материал удаляется через выпускное устройство. Заданное влагосодержание на выходе обеспечивается выбором режимных характеристик: мощности магнетронов, температуры и скорости сушильного агента, скорости слоя, а также высоты канала.

При формулировке модели теплопереноса используются следующие представления. Плотный продуваемый слой рассматривается как двухкомпонентная система, состоящая из твердого (частиц) и газового (сушильный агент) компонентов, между которыми протекает межкомпонентный тепломассообмен. СВ энергия, поглощаемая частицами, учитывается как положительный внутренний источник теплоты в твердом компоненте. На основании экспериментальных данных [15] принято, что производительность этого источника убывает по экспоненциальному закону по мере удаления от входного сечения, где подводится СВ энергия. Расход теплоты на испарение влаги учитывается, как отрицательный источник теплоты в твердом компоненте. Производительность этого источника, зависящая от скорости сушки, остается неизменной на участке постоянной скорости и убывает по высоте канала по экспоненциальному закону на участке падающей скорости.

Приняты следующие допущения:

- свойства компонентов неизменны, не зависят от температуры и влагосодержания;
- подводимая СВ энергия, температуры и скорости компонентов распределены по сечению канала равномерно;
- тепловые потери через стенки канала пренебрежимо малы.

При таких условиях температуры компонентов изменяются только по высоте канала, т.е. температурные поля одномерны.

Математическая модель процесса теплопереноса включает уравнения энергии газового и твердого компонентов и граничные условия. Эти уравнения для участка падающей скорости сушки имеют следующий вид (при пренебрежимо малом про-

дольном переносе теплоты теплопроводностью) [16-18]:

$$\rho_z c_{pz} w_z (1 - \beta) \frac{d\vartheta_z}{dx} = \alpha_m a (\vartheta_m - \vartheta_z) \quad (1)$$

$$\rho_m c_m w_m \beta \frac{d\vartheta_m}{dx} = \alpha_m a (\vartheta_z - \vartheta_m) + q_{v1} e^{mx} + q_{v2} e^{nx} \quad (2)$$

Граничные условия на входе:

$$\text{при } x = 0: \vartheta_z = \vartheta_{z0} = 0 \quad (4.21); \quad t_m = t_{m0};$$

$$\vartheta_m = \vartheta_{m0} \quad (3).$$

$$\text{Здесь: } \vartheta_z = t_z - t_{z0}; \quad \vartheta_m = t_m - t_{z0};$$

$\vartheta_{m0} = t_{m0} - t_{z0}$ - избыточные температуры компонентов; q_{v1}, q_{v2} - производительность внутренних источников теплоты во входном сечении, Вт/м³.

Производительность источника, обусловленного испарением влаги, определяется соотношением

$$q_{v2} = \rho_c r \frac{d\bar{u}}{d\tau}, \text{ Вт/м}^3, \quad (4);$$

Решение системы уравнений (1,2) с граничными условиями (3) позволило получить следующие зависимости для распределения температур компонентов на участке падающей скорости сушки:

$$\vartheta_z = -\frac{B_1 \vartheta_{m0}}{P_2} + \frac{B_1}{P_2} \left(\vartheta_{m0} + \frac{H_1}{P_2 - m} + \frac{H_2}{P_2 - n} \right) e^{P_2 x} + \frac{H_1 B_1}{m} \left[\frac{e^{mx}}{(m - P_2)} + \frac{1}{P_2} \right] + \frac{H_2 B_1}{n} \left(\frac{e^{nx}}{n - P_2} + \frac{1}{P_2} \right), \quad (5);$$

$$\vartheta_m = \vartheta_z + \left(\vartheta_{m0} + \frac{H_1}{P_2 - m} + \frac{H_2}{P_2 - n} \right) e^{P_2 x} + \frac{H_1}{m - P_2} e^{mx} + \frac{H_2}{n - P_2} e^{nx}, \quad (6);$$

$$\text{Здесь: } B_1 = \frac{\alpha_m a}{\rho_z c_{pz} (1 - \beta) w_z}, \text{ м}^{-1}, \quad (7);$$

$$B_2 = \frac{\alpha_m a}{\rho_m c_m \beta w_m}, \text{ м}^{-1}, \quad (8)$$

$$H_1 = \frac{q_{v1}}{\rho_m c_m \beta w_m}, \text{ К/м}, \quad (9);$$

$$H_2 = \frac{q_{v2}}{\rho_m c_m \beta w_m}, \text{ К/м}, \quad (10);$$

$P_2 = -(B_1 + B_2)$ (11) - корень характеристического уравнения.

Как видно из (5, 6), температуры компонентов и темп их изменения по высоте сушилки зависят от следующих факторов:

-производительности внутренних источников теплоты (положительного, обусловленного погло-

щенням подводимой микроволновой энергии влажными частицами, и отрицательного, обусловленного расходом теплоты на испарение влаги, т.е. скоростью сушки), закона изменения производительности источников по высоте; температур компонентов на входе; скоростей компонентов; интенсивности межкомпонентного теплообмена; размера частиц; физических характеристик компонентов.

В одном и том же сечении, температуры компонентов различны. При $x=idem$ разность этих температур определяется выражением:

$$\mathcal{G}_m - \mathcal{G}_2 = (\mathcal{G}_{m0} + \frac{H_1}{P_2 - m} + \frac{H_2}{P_2 - n})e^{P_2x} + \frac{H_1}{m - P_2}e^{mx} + \frac{H_2}{n - P_2}e^{nx}, \quad (12).$$

Она зависит от разности температур на входе (при $x=0$), производительности источников, абсолютного значения P_2 . Из выражений (7, 8, 11) видно, что абсолютное значение $|P_2|$ тем меньше, чем ниже тепловой поток, переносимый в процессе межкомпонентного теплообмена, по сравнению с тепловым потоком, переносимым компонентами конвекцией. По высоте сушилки разность температур убывает.

На участке постоянной скорости сушки распределение температур компонентов описывается следующими зависимостями:

$$\mathcal{G}_2 = \frac{B_1 \mathcal{G}_{m0}}{P_2} (e^{P_2x} - 1) + H_1 \left[\frac{1}{P_2(P_2 - m)} e^{P_2x} + \frac{1}{m(m - P_2)} e^{mx} + \frac{1}{P_2 m} \right] + H_2 \left(\frac{1}{P_2^2} e^{P_2x} - \frac{1}{P_2^2} - \frac{x}{P_2} \right), \quad (13);$$

$$\mathcal{G}_m = \mathcal{G}_2 + \mathcal{G}_{m0} e^{P_2x} + \frac{H_1}{m - P_2} (e^{mx} - e^{P_2x}) - \frac{H_1}{P_2} (1 - e^{P_2x}), \quad (14).$$

Возможны случаи, когда источник, обусловленный поглощением МВ энергии, также не изменяется по высоте канала ($m=0$) (когда коэффициент ослабления потока энергии в слое мал либо магнетроны размещены в нескольких сечениях по высоте на небольших расстояниях друг от друга). В таких случаях уравнения (13, 14) приобретают вид:

$$\mathcal{G}_2 = \frac{B_1 \mathcal{G}_{m0}}{P_2} (e^{P_2x} - 1) + B_1 (H_1 + H_2) \cdot \left(\frac{1}{P_2^2} e^{P_2x} - \frac{1}{P_2^2} - \frac{x}{P_2} \right), \quad (15);$$

$$\mathcal{G}_m = \mathcal{G}_2 + \mathcal{G}_{m0} e^{P_2x} + \frac{H_1 + H_2}{P_2} (e^{P_2x} - 1), \quad (4.35) \quad (16).$$

Если в слое отсутствуют внутренние источники, то температуры компонентов определяются

только условиями межкомпонентного теплообмена и их изменение по высоте канала описывается зависимостями:

$$\mathcal{G}_2 = \frac{B_1 \mathcal{G}_{m0}}{P_2} (e^{P_2x} - 1), \quad (17);$$

$$\mathcal{G}_m = \mathcal{G}_2 + \mathcal{G}_{m0} e^{P_2x}, \quad (18).$$

При режимах, в которых тепловой поток, обусловленный межкомпонентным теплообменом, существенно превышает тепловой поток, переносимый компонентами конвекцией, температуры компонентов при $x=idem$ практически одинаковы ($e^{P_2x} \rightarrow 0, \mathcal{G}_m \approx \mathcal{G}_2$).

Частные случаи

а) Теплоперенос в движущемся слое при микроволновой сушке.

В этом случае продувка сушильного агента через слой отсутствует, сушка осуществляется только за счет МВ энергии. Используется однокомпонентная модель, согласно которой непродуваемый плотный слой рассматривается как квазигомогенная среда с эффективными характеристиками – плотностью $\rho_{cl} = \rho_m \beta$, теплоемкостью

$$\bar{c}_{cl} = \rho_c c_{pe} (1 - \beta) + \rho_m c_m \beta \approx \rho_{cl} c_m, \quad .$$

Уравнение энергии слоя для участка падающей скорости сушки:

$$\rho_{cl} c_m w_{cl} \frac{d\mathcal{G}_{cl}}{dx} = q_{v1} e^{mx} + q_{v2} e^{nx}, \quad (19).$$

Изменение температуры слоя по высоте канала определяется зависимостью:

$$\mathcal{G}_{cl} = \frac{H'_1}{m} (e^{mx} - 1) + \frac{H'_2}{n} (e^{nx} - 1), \quad (20).$$

Для участка постоянной скорости сушки ($n=0$) распределение температуры слоя можно найти из следующей формулы:

$$\mathcal{G}_{cl} = \frac{H'_1}{m} (e^{mx} - 1) + H'_2 x, \quad (21).$$

В формуле (20) $H'_1 = \frac{q_{v1}}{\rho_{cl} c_{cl} w_{cl}}$, К/м;

$$H'_2 = \frac{q_{v2}}{\rho_{cl} c_{cl} w_{cl}}, \text{ К/м} \quad (22).$$

$$v_{cl} = t_{cl} - t_{cl0}$$

б) Теплоперенос в неподвижном слое при микроволново-конвективной сушке.

Математическая модель процесса для этого случая имеет вид:

$$\rho_c c_{pe} w_c (1 - \beta) \frac{d\mathcal{G}_2}{dx} = \alpha_m a (\mathcal{G}_m - \mathcal{G}_2), \quad (23);$$

$$\alpha_m a (\mathcal{G}_2 - \mathcal{G}_m) + q_{v1} e^{-mx} + q_{v2} e^{-nx} = 0, \quad (24);$$

при $x = 0: \mathcal{G}_2 = \mathcal{G}_{20} = 0 \quad (25).$

Здесь: $\mathcal{G}_z = t_z - t_{z0}$; $\mathcal{G}_m = t_m - t_{z0}$;

Температуры компонентов на участке падающей скорости сушки описываются следующими уравнениями:

$$\mathcal{G}_z = \frac{q_{v1}}{D} \left[-\frac{1}{m} e^{mx} + \frac{1}{m} \right] + \frac{q_{v2}}{D} \left[-\frac{1}{n} e^{nx} + \frac{1}{n} \right], \quad (26);$$

$$\mathcal{G}_m = \mathcal{G}_z + \frac{q_{v1}}{B} e^{mx} + \frac{q_{v2}}{B} e^{nx}, \quad (27).$$

Здесь: $B = \alpha_m a$, Вт/(м³К);

$$D = \rho_z c_{p_z} w_z (1 - \beta), \text{ Вт/(м}^2\text{К)}, \quad (28).$$

Разность температур компонентов в одном и том же сечении ($x=\text{idem}$)

$$\mathcal{G}_m - \mathcal{G}_z = \frac{q_{v1}}{B} e^{mx} + \frac{q_{v2}}{B} e^{nx}, \quad (29).$$

Для температур компонентов на участке постоянной скорости сушки ($n=0$) справедливы формулы:

$$\mathcal{G}_z = \frac{q_{v1}}{D} \left[-\frac{1}{m} e^{mx} + \frac{1}{m} \right] + \frac{q_{v2}}{D} x, \quad (30);$$

$$\mathcal{G}_m = \mathcal{G}_z + \frac{q_{v1}}{B} e^{mx} + \frac{q_{v2}}{B}, \quad (31).$$

По приведенным зависимостям проведены расчеты температурных полей в слое на участке падающей скорости сушки при различных условиях [18]. В расчетах изменяли: скорость сушильного агента w_z (0,2-2,0 м/с); скорость движения слоя w_m ($0.5 \cdot 10^{-3} - 10^{-3}$ м/с); диаметр частиц d_m ($3 \cdot 10^{-3} - 9 \cdot 10^{-3}$ м); значения положительного ($q_{v1} = (10^4 \div 10^6)$ Вт/м³) и отрицательного ($q_{v2} = (-10^4 \div -10^6)$ Вт/м³) источника теплоты в твердом компоненте; коэффициент ослабления микроволновой энергии в слое m ($-30 \div 0$), $n = (0 \div -6)$. Рассмотрим влияние q_{v1} - положительного внутреннего источника при следующих исходных данных: $t_{m0} = 20$ °С, $t_{z0} = 100$ °С, $d_m = 0,003$ м, $n = -6$, $m = -30$. По высоте канала на начальном участке температура газа уменьшается, а температура частиц увеличивается в результате межкомпонентного теплообмена (рис. 1).

В одном и том же сечении (при $x=\text{idem}$) с увеличением производительности положительного внутреннего источника температуры обоих компонентов возрастают. Эта зависимость наблюдается при различных скоростях, диаметрах частиц, разных m .

При $x > 0,06$ м температура твердого компонента убывает т.к. из-за существенного ослабления потока микроволновой энергии в слое значение q_{v1} резко уменьшается и начинает больше влиять отрицательный источник теплоты q_{v2} .

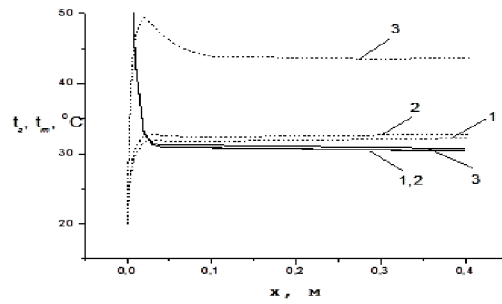


Рис. 1. Распределения температур компонентов по высоте канала при различных мощностях магнетрона $w_z = 0.2 \text{ м / с}$; $w_m = 0.001 \text{ м / с}$;

$q_{v2} = 10^5 \text{ Вт/м}^3$; 1- $q_{v1} = 10^4 \text{ Вт/м}^3$; 2- $q_{v1} = 10^5 \text{ Вт/м}^3$; 3- $q_{v1} = 10^6 \text{ Вт/м}^3$ --- частицы; __ газ

При различных значениях производительности отрицательного источника на начальном участке также наблюдается уменьшение температуры газа и рост температуры частиц по высоте канала (рис 2). При увеличении расхода теплоты на испарение (производительности отрицательного источника) температуры газа и частиц становятся ниже (в одном и том же сечении). Эта зависимость наблюдается при различных скоростях, диаметрах частиц, разных m .

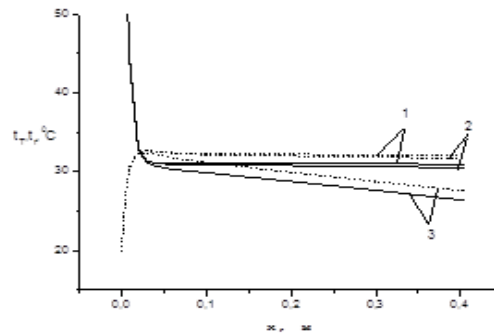


Рис. 2. Распределения температур компонентов по высоте канала при различных значениях производительности отрицательного внутреннего источника

теплоты $w_z = 0.2 \text{ м / с}$; $w_m = 0.001 \text{ м / с}$; $q_{v1} = 10^5 \text{ Вт/м}^3$; 1- $q_{v2} = -10^4 \text{ Вт/м}^3$; 2- $q_{v2} = -10^5 \text{ Вт/м}^3$; 3-

$q_{v2} = -10^6 \text{ Вт/м}^3$; --- частицы; __ газ

В случае уменьшения коэффициента ослабления СВ энергии в слое ($m = -30; -6; 0$) температура газа снижается менее интенсивно (рис. 3), а температура твердых частиц растет с большей интенсивностью (рис. 4) в связи с менее существенным убыванием q_{v1} (рис. 5). В случае, если $m=0$, т.е. производительность положительного источника теплоты остается постоянной по всей высоте сушилки, наблюдается резкий рост температур компонентов (рис. 3 и 4, кривые 3). Такая зависимость наблюдается при различных значениях q_{v1} , q_{v2} , d , w_z , w_m .

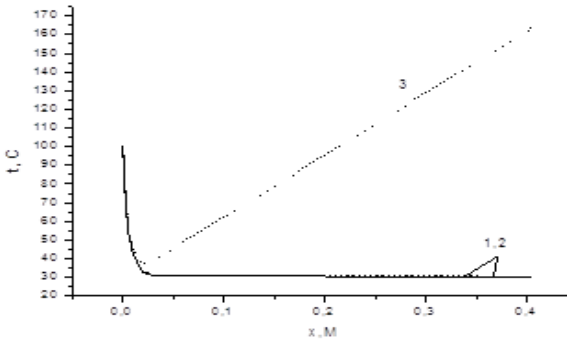


Рис. 3. Распределения температуры газа по высоте канала при различных коэффициентах ослабления МВ энергии. 1- $m = -30$; 2 - $m = -6$; 3 - $m = 0$

$$q_{v1} = 10^4 \frac{Bm}{M^3}; \quad q_{v2} = -10^5 \frac{Bm}{M^3}; \quad w_2 =$$

$$0.2 M/c; \quad w_m = 0.001 M/c; \quad d_m = 0,003 \text{ м.}$$

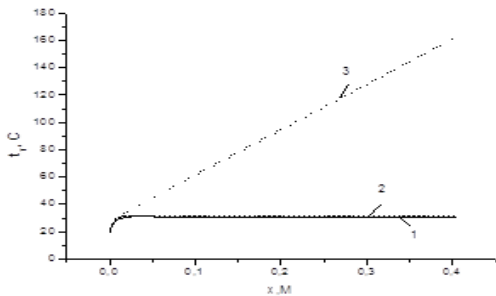


Рис. 4. Распределения температуры частиц по высоте канала при различных коэффициентах ослабления потока МВ энергии

$$q_{v1} = 10^4 \frac{Bm}{M^3}; \quad q_{v2} = -10^5 \frac{Bm}{M^3};$$

$$w_m = 0.001 M/c; \quad d = 0,003 \text{ м}; \quad w_2 = 0.2 M/c; \quad 1 - m = -30; \quad 2 - m = -6; \quad 3 - m = 0$$

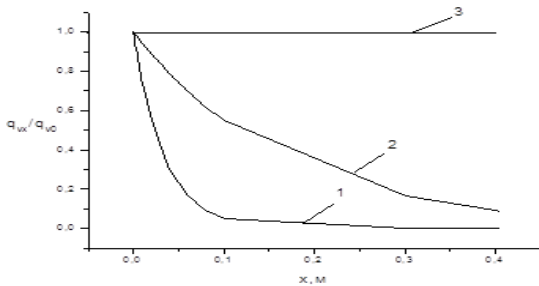


Рис. 5. Относительное изменение интенсивности МВ энергии в слое при различных коэффициентах ослабления: 1- $m = -30$; 2 - $m = -6$; 3 - $m = 0$

Скорость газа (сушильного агента) влияет на распределение температур следующим образом. При ее возрастании на начальном участке температура газа снижается медленнее, а температура частиц возрастает быстрее. При высоких скоростях газ температуры компонентов по всей высоте сушилки выше, чем при малых скоростях (рис. 6). Как видно из рис. 6, температуры частиц при $x > 0,03 \text{ м}$ становятся выше температур газа, изменяется направление теплового потока. При $x < 0,03 \text{ м}$ частицы получают тепло от нагретого воздуха, а затем, когда воздух охладился, он нагревается от

частиц, температура которых растет в связи с действием внутреннего положительного источника теплоты. Уменьшение разности температур компонентов с увеличением скорости газа объясняется интенсификацией межкомпонентного теплообмена (рис. 7).

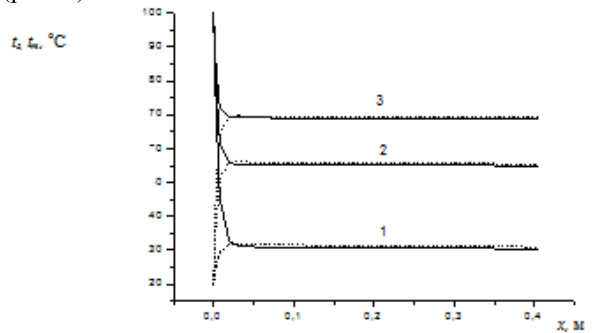


Рис. 6. Распределения температур компонентов по высоте канала при различных скоростях сушильного агента $q_{v1} = 10^4 \text{ Вт/м}^3$; $q_{v2} = -10^4$

$$\text{Вт/м}^3; \quad w_m = 0.001 M/c; \quad d_m = 0,003 \text{ м.}$$

$$1 - w_2 = 0.2 M/c; \quad 2 - w_2 = 1 \text{ м/с}; \quad 3 - w_2 = 2 M/c \quad \text{--- частицы; _ газ}$$

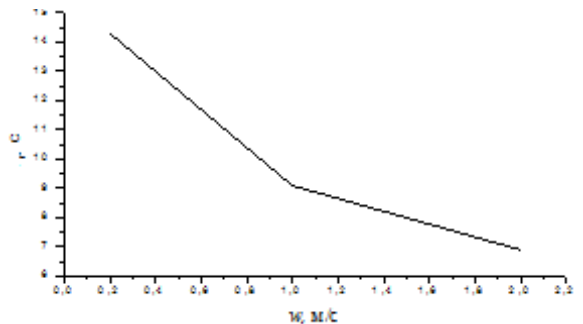


Рис. 7. Зависимость разности температур компонентов от скорости газа: $x = 0,01 \text{ м}$;

$$q_{v1} = 10^4 \frac{Bm}{M^3}; \quad q_{v2} = -10^5 \frac{Bm}{M^3}; \quad m = -30$$

При увеличении диаметра частиц на начальном участке температура газа снижается, а температура частиц возрастает медленнее в связи с увеличением термического сопротивления межкомпонентного теплообмена. При уменьшении скорости движения слоя наблюдается увеличение температур компонентов при $x = \text{idem}$ в связи с уменьшением расхода материала (рис. 8).

Аналогично изменяются температуры компонентов на участке постоянной скорости суши. При различных режимах изменение температур компонентов на начальном участке определяется, в основном, интенсивностью межкомпонентного теплообмена. На некотором расстоянии от входного сечения эти температуры сближаются, темп и характер их дальнейшего изменения зависят от производительности внутренних источников теплоты. При достаточно высоких значениях q_{v1} температура

частиц становится выше температуры газа, направление теплового потока изменяется.

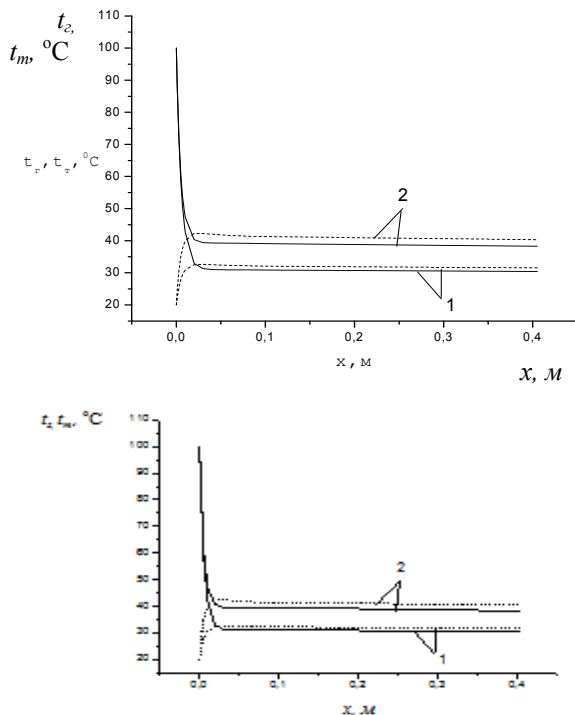


Рис. 8. Распределения температур компонентов по высоте канала при разных скоростях движения

слоя $q_{v1} = 10^4 \frac{Bm}{M^3}$; $q_{v2} = -10^5 \frac{Bm}{M^3}$;
 $m=30$; $w_2 = 0.2m/c$ 1- $w_m = 10^{-3} m/c$; 2-
 $w_m = 0.5 \cdot 10^{-3} m/c$; --- частицы; — газ

Вариантные расчеты по приведенным зависимостям позволяют выбрать оптимальные режим-

ные параметры, обеспечивающие высокую скорость сушки без перегрева материала.

Выводы

1. Расчет по зависимостям, описывающих сушку дисперсного материала в движущемся плотном слое при микроволново-конвективном и микроволновом подводе энергии, верно отражает физические процессы переноса теплоты и влаги в рассматриваемых условиях.

2. Приведенные зависимости позволяют аналитически определить влияние различных параметров (мощность магнетронов, коэффициент ослабления, скорость воздуха, скорость слоя, диаметр частиц) на распределение температур твердого и газового компонентов по высоте сушилки.

3. С увеличением скорости газа разность температур компонентов уменьшается, что объясняется интенсификацией межкомпонентного теплообмена.

Обозначения

d_m - диаметр частиц, м; r - удельная теплота парообразования, Дж/кг; Q - тепловой поток, Вт; $q_{уд}$ - удельный расход энергии на испарение влаги, мДж/м²; q_M - удельный тепловой поток, Вт/кг; q_v - производительность внутренних источников теплоты, Вт/м³; t - температура, °C; u - влагосодержание дисперсного материала, кг/кг; W - скорость, м/с; X - координата, м; α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К); β - плотность укладки слоя; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ρ - плотность, кг/м³; U - избыточная температура, К; τ - время, с. Индексы: g - газовый, M - межкомпонентный, m - твердый, 0 - начальное значение, $ст$ - стенка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бувевич Ю.А., Казенин Д.А. О переносе тепла или массы к телам разной формы, погруженным в неподвижный или слабооживленный зернистый слой // Теплообмен V. - Минск: Материалы V всесоюзной конф. по теплообмену. - 1976. - Т.6. - С. 19-24.
- Бувевич Ю.А., Казенин Д.А. Предельные задачи о переносе тепла или массы к цилиндру и сфере, погруженным в инфильтруемый зернистый слой // ПМТФ - 1977. - № 5. - С 94-102.
- Календерьян В.А., Корнараки В.В. Теплообмен и сушка в движущемся плотном слое. - Киев: Вища школа. - 1982. - 160с.
- Бувевич Ю.А. К теории переноса в гетерогенных средах // Инж.-физ. Журнал. - 1988 - Т. 54. - № 5. - С. 770-779.
- Антонишин Н.В., Лушиков В.В. Перенос тепла в дисперсных средах // Исследование процессов переноса в дисперсных системах. Сборник научных статей. Минск. - 1984. - С. 113-129.
- Denloye A.O. Gas convective heat transfer to packed and fluidized beds. A. I. Ch. E. Symp. Ser., 1978. - V. 74. - № 176. - 194-202.
- Kubicek M., Holodniok M. Two-phase model of a tubular non-adiabatic reactor with axial dispersion and gas-to-solid heat and mass transfer. Numerical method for steady analysis // Heat transfer Proc., 7-th Int. Conf., München. - 1982. - V.6. - P. 25-31.
- Нустров В.С., Сайфуллаев Б.Н. Метод эквивалентного уравнения в теории тепломассопереноса. Инж.-физ. Журнал. - 1988. - Т. 54. - № 5. - С. 779-786.
- Бесков В.С. Модели процессов в неподвижном слое катализатора и их использование // Моделирование химических процессов и реакторов: Сб. научных статей. - Новосибирск. - 1971. - Т.1. - С. 114-140.
- Нустров В.С., Сайфуллаев Б.Н. Метод эквивалентного уравнения в теории тепломассопереноса // Инж.-физ. Журнал. - 1988. - Т. 54. - № 5. - С. 779-786.
- Dixon A.G., Cresswell L.L. Theoretical prediction of effective heat transfer parameters in packed bed // A.I. Ch. E. Journal. - 1979. - V. 25. - № 4. - P.663-676.
- Schlünder E.U. Equivalence of one-and two-phase modelles for heat transfer processes in packed beds: one dimensional theory//Chem. Eng. Sci. - 1975. - V.30. - № 4.
- Gros J.B., Bugarel R. Etude comparative de modelles catalitiques a lit fixe //The Chem. Eng, J - 1977. - V. 13. - № 3. - P. 165-167.
- Бувевич Ю.А., Перминов Е.Б. Нестационарный нагрев неподвижного зернистого массива // Инж.-физ. Журнал. - 1980. - Т. 38. - № 1. - С.29-37.
- Волгушева Н.В. Кинетика сушки плотного слоя дисперсного материала (на примере гречихи) при различных способах подвода теплоты. Дисс. канд. техн. наук. Одесса. - 2005. - 225 с.
- Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Теплоперенос в процессе сушки плотного слоя дисперсного материала при микроволново-конвективной сушке // VI Минский международный форум по тепло- и массообмену. Минск. - 2008. Тезисы докладов и сообщений. - Т.2. - 206-207.

17. Календерьян В.А., Бошкова И.Л., Островская Е.В. Математические модели теплопереноса в процессе сушки дисперсных материалов при использовании микроволновой энергии // Пищевая наука и технология. Научно-производственный журнал. – 2008. – № 1. – С. 51-54.
18. Бошкова И.Л., Волгушева Н.В. Влияние режимных параметров на распределение температур в движущемся плотном слое дисперсных материалов при микроволново-конвективной сушке // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32. – № 1. – С. 37-43.

Отримано редакцією 11.2013 р.

УДК [641.521:639.3/6]:641.8

**БЕЗУСОВ А.Т., д-р техн. наук, проф., МАНОЛІ Т.А., канд. техн. наук, доцент,
ПАМБУК С.А., канд. техн. наук, асистент**

Одеська національна академія харчових технологій

ВПЛИВ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ПРИ ПОМІРНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ НА ОРГАНОЛЕПТИЧНІ ПОКАЗНИКИ КУЛІНАРНИХ ВИРОБІВ З МОРЕПРОДУКТІВ

У статті наведені дослідження впливу теплової обробки при помірних температурах на зміни органолептичних показників кулінарних виробів з кальмара, рапани і товстолобика. Дослідження органолептичних характеристик проводились профільним методом. Наведено профілі зовнішнього виду, кольору, смаку, запаху і консистенції дослідних зразків. Показано, що підібрані режими обробки дозволяють отримати задані органолептичні показники готових кулінарних виробів.

Ключові слова: гидробионты, кулинарные изделия, тепловая обработка, органолептические показатели.

The article presents the study of the influence of heat treatment at moderate temperatures to changes in organoleptic characteristics of food products from squid, *Rapana thomasiana* and silver carp (*Hypophthalmichthys*). Studies carried out organoleptic profile method. Shown the profiles of appearance, color, taste, smell and texture prototypes. Shown that treatment regimens selected reference can be obtained organoleptic ready food products.

Keywords: aquatic, culinary products, heat treatment, organoleptic characteristics.

Кулінарне виробництво займає значне місце в рибопереробній галузі. Для кулінарного виробництва характерний великий асортимент, який продовжує постійно розширюватися. Водночас обсяги виробленої кулінарної продукції обмежені, так як більшість кулінарної продукції належить до швидкопсувної з обмеженими термінами зберігання.

Широкий асортимент кулінарних виробів з морепродуктів дозволяє раціонально переробляти сировину. Зміна видового складу сировини диктує необхідність розробки нових видів кулінарних виробів, що дасть можливість підвищити попит на ці продукти, а також збільшити обсяги продажів і споживання рибного білка.

У кулінарному виробництві основною сировиною може служити риба і нерибні об'єкти промислу, в першу чергу, такі види, які не можуть бути успішно використані для випуску традиційної продукції [1, 2].

В якості об'єктів дослідження і сировини для виробництва кулінарних виробів обрали товстолобика строкатого, оскільки риби внутрішніх водоймищ займають не останнє місце в рибопереробній галузі України, а також нерибні об'єкти – рапана чорноморська і кальмар тихоокеанський.

Кальмари знаходять широке застосування у виробництві кулінарних виробів. М'ясо кальмара характеризується високими смаковими властивостями і харчовою цінністю, містить значну кількість

білка (до 20 %), невелику кількість жиру (0,2 ... 1,4 %). М'ясо кальмара багате екстрактивними азотистими речовинами, що додають йому приємний своєрідний смак. Перспективною сировиною в технології кулінарних виробів є також рапана чорноморська (*Rapana thomasiana*) – черевоногий молюск, популяція якого в Чорному морі досягла промислових об'ємів [3].

Для приготування кулінарних виробів використовували теплову обробку при помірних температурах, які забезпечують оптимальні умови для дії власних ферментів, що розщеплюють білкові речовини і тим самим впливають на органолептичні властивості і якість кулінарних виробів.

Попередні дослідження показали, що кількість азоту летких основ і буферна ємність м'язової тканини гидробионтів зростають при обробці помірними температурами, оскільки відбувається безперервне накопичення низькомолекулярних азотистих речовин за рахунок створення оптимальних умов автопротеолізу. Найбільш інтенсивні зміни сировини відбувались при температурі 45 °С [4, 5].

Кремоподібна консистенція для кожного виду гидробионтів досягається у своєму температурному режимі, однак можна відзначити, що при помірних температурах, де спостерігаються менш істотні втрати поживних речовин, наприклад 45 °С, можна отримати бажаний результат, змінюючи тільки тривалість обробки.

Кулінарну обробку товстолобика, кальмара і рапани проводили при температурі 45 °С протягом 5-ти годин. В результаті такої обробки, як показали дослідження, значно змінюються реологічні властивості м'язової тканини сировини. Отже, надалі для розробки технології кулінарних виробів з гидробионтів важливо дослідити вплив помірних температур обробки на зміну органолептичних показників кулінарних виробів.

Метою досліджень було встановлення впливу теплової обробки при помірних температурах на зміну органолептичних показників сировини. При дослідженні органолептичних характеристик кулінарних виробів використовували профільний метод, застосування якого найбільш доцільно при розробці нових видів продукції, складанні нових