

УДК 664.951.32

И. Э. Бражная, Ю. Т. Глазунов, А. М. Ершов

Изучение процесса дымообразования во фрикционном дымогенераторе и решение обратной задачи теплопроводности

I. E. Brazhnaya, Yu. T. Glazunov, A. M. Ershov

Studying the process of smoke generation in the friction smoke generator and solution of the inverse problem of heat conduction

Аннотация. Представлены результаты анализа оптимального диапазона влажности древесины для производства дыма во фрикционном дымогенераторе, влияния начальной массовой доли воды в древесине на цветообразование готовой продукции, зависимости температурного распределения в полубесконечной среде от времени нагревания; приведено решение обратной задачи теплопроводности.

Abstract. The paper contains the analysis of the optimal range of wood humidity for smoke production in the friction smoke generator, the impact of the initial mass fraction of water in the wood on color formation on the finished product, the dependence of temperature distribution in a semi-infinite medium on the heating time. The results of solving the inverse heat conduction problem have been shown.

Ключевые слова: фрикционный дымогенератор, влажность древесины для производства дыма, распределение температурного фронта в полубесконечной среде, коэффициент теплопроводности.

Key words: friction smoke generator, wood moisture content for smoke production, temperature distribution in semi-infinite medium, thermal diffusivity.

Введение

Развитие рыбной промышленности предполагает комплексное решение задач вылова, технологической переработки и воспроизводства гидробионтов. Рыбные продукты являются источником белков животного происхождения, полиненасыщенных жирных кислот, витаминов, макро- и микроэлементов. При реконструкции существующего и организации нового производства в современных экономических условиях необходимо расширять ассортимент и улучшать качество пищевой продукции. Особое внимание уделяется канцерогенной безопасности продукции и экологии промышленного производства, а также совершенствованию конструкций дымогенераторов* [1]. Коптильный дым, полученный с помощью фрикционных дымогенераторов, отличается повышенным содержанием карбонильных соединений, кислот, фенолов и практически не содержит канцерогенных веществ [2], [3]. Однако опытным путем установлено, что рыбное сырье, выкопченное таким дымом, практически не изменяет цвет поверхности и в результате не соответствует требованиям нормативной документации по органолептическим показателям. Интенсифицировать процесс цветообразования можно за счет увеличения паровой фазы дыма [4, с. 2].

Материалы и методы

В связи с особенностями конструкции фрикционного дымогенератора распределение температурных полей внутри образцов изучали в статическом режиме на лабораторной установке с электроподогревом. Для экспериментальных исследований были изготовлены образцы с просверленными на разных уровнях от поверхности нагрева отверстиями для размещения в них термопар. Изучение скорости пиролиза и распределение температурных полей в древесине в динамичном режиме проводили на промышленном фрикционном дымогенераторе конструкции Мурманского высшего инженерного морского училища имени Ленинского комсомола (разработчик А. М. Ершов) с использованием образцов древесного сырья размером 80×80×400 мм с различной начальной влажностью. В образцах отверстия для термопар были просверлены на расстоянии 50 мм от поверхности вращающегося барабана дымогенератора. Для измерения температуры пиролиза использовали цифровой потенциометр ХК (L) с интервалом измеряемых температур от 0 до 800 °С (0,15/0,05) и тарированные хромель-копелевые термопары. Тарирование термопар проводили в термостате типа ТС-24. Время контролировали секундомером. Массовую долю воды в древесном сырье определяли по стандартным методикам. Все измерения проводили в трехкратной повторности. Экспериментальные результаты обрабатывали общепринятыми методами математической статистики. При определении зависимости скорости прогревания древесины от ее влажности необходимо решить обратную задачу теплопроводности по известным из эксперимента температурным полям, с учетом

* Устройство для генерации коптильного дыма : пат. 2363163 Российская Федерация. № 2008109680/13 ; заявл. 11.03.08 ; опубл. 10.08.09, Бюл. № 22. 6 с. Устройство для генерации дыма : пат. 2468587 Российская Федерация. № 2011118048/10 ; заявл. 04.05.12 ; опубл. 10.12.12, Бюл. № 34. 6 с.

начальных и граничных условий определить коэффициент температуропроводности среды. В решении этой задачи был применен метод интегральных балансов, предложенный в 1958 г. М. Гудманом и развитый позднее в работах Ю. А. Михайлова и Ю. Т. Глазунова [5].

Результаты исследований и их обсуждение

Исследования на базе экспериментального цеха МГТУ при производстве рыбы холодного копчения, показали, что предварительное увлажнение древесины для ее использования во фрикционном дымогенераторе позволяет получить готовый продукт, удовлетворяющий требованиям действующей нормативной документации по всем органолептическим показателям. Для определения оптимального диапазона влажности древесины изучено влияние начальной массовой доли воды в древесине на процесс цветообразования в копченой продукции. Установлено, что при использовании древесного топлива с массовой долей воды менее 50 % процесс цветообразования замедляется; при влажности больше 50 % – возрастает. При увеличении влажности наблюдается снижение времени копчения при одинаковых цветовых характеристиках готовой продукции. С другой стороны, при увеличении влажности древесины выше 70 % отмечено замедление начала процесса дымообразования, интенсивное конденсирование паровой фазы дыма внутри дымогенератора, в результате увеличивается расход электроэнергии для интенсификации процесса дымообразования. Таким образом, для исследования процесса дымообразования фрикционным способом было принято решение применять древесину с начальной влажностью от 50 до 70 % [4, с. 3–6]. В процессе работы были проведены экспериментальные исследования по установлению зависимости скорости прогревания от начальной влажности древесины (рис. 1).

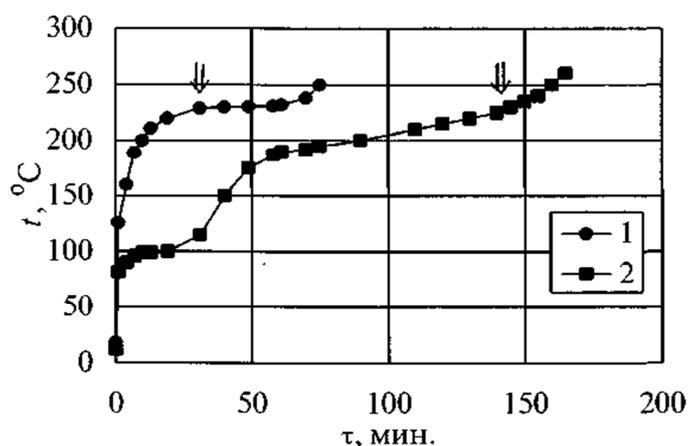


Рис. 1. Изменение температуры древесины на поверхности бруска: 1 – сухая древесина ($W = 3,0\%$); 2 – с начальной массовой долей воды $W = 56,3\%$; \Downarrow – точка начала устойчивого дымообразования [4, с. 3–6]

Из рис. 1 видно, что начальная температура дымообразования не зависит от влажности древесины и составляет $(230 + 2)$ $^\circ\text{C}$. Приведенные результаты не противоречат известным литературным сведениям, описывающим "дымовой термометр", где нижний температурный предел дымообразования равен 210 $^\circ\text{C}$ [3], [6].

Результаты измерений температурных полей внутри образцов приведены на рис. 2–5.

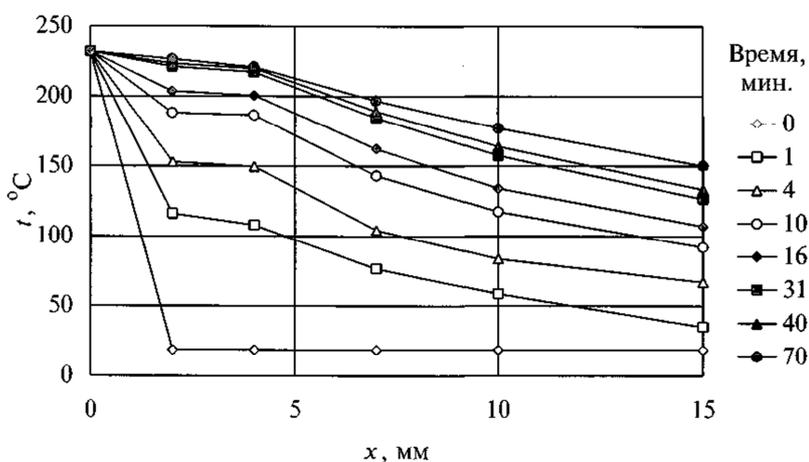


Рис. 2. Изменение температуры воздушно-сухой древесины ($W = 3,0\%$) на различном удалении от греющей поверхности [4, с. 3–6], [8, с. 12]

Анализ результатов экспериментов (рис. 3–5) показывает, что влажность древесины влияет на скорость ее прогрева. При обезвоживании древесины изменяются ее теплофизические характеристики. Воздушно-сухая древесина прогревается быстрее увлажненной. Представленные экспериментальные графики имеют участок с близкой к нулевой скоростью прогрева при температуре около 100 °С. При нагревании увеличение влажности древесины за счет активного отвода тепла при изменении фазового состояния содержащейся в ней воды приводит к заметному снижению скорости прогрева [4], [9, с. 102–103], влияет на теплофизические характеристики древесины и определяет значение коэффициента температуропроводности a .

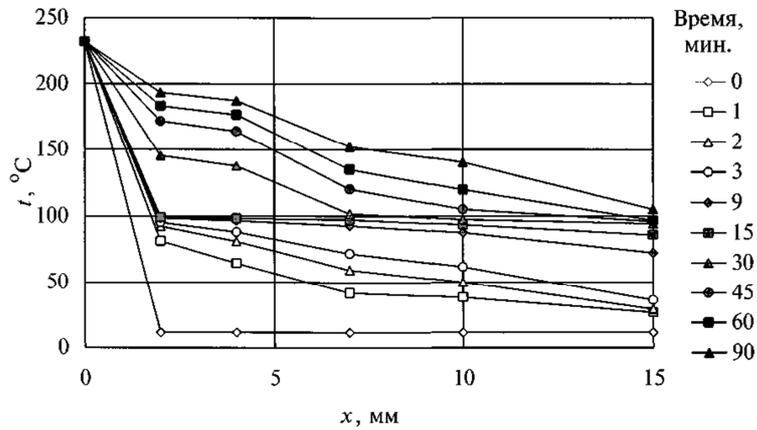


Рис. 3. Изменение температуры древесины при влажности $W = 56,3\%$ на различном удалении от греющей поверхности [4, с. 3–6], [8, с. 12]

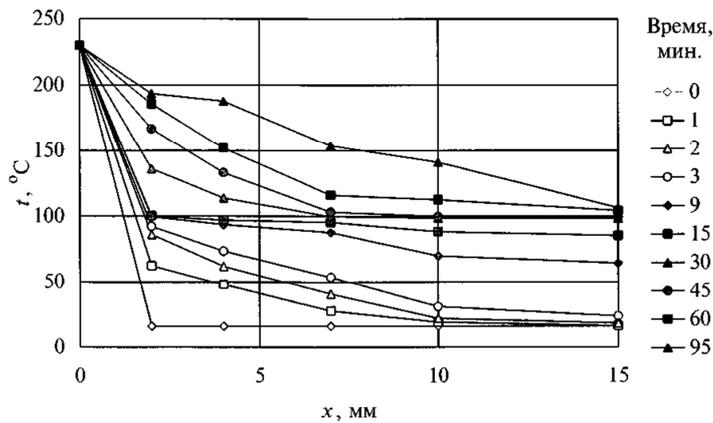


Рис. 4. Изменение температуры древесины при влажности $W = 70,8\%$ на различном удалении от греющей поверхности [4, с. 3–6], [8, с. 12]

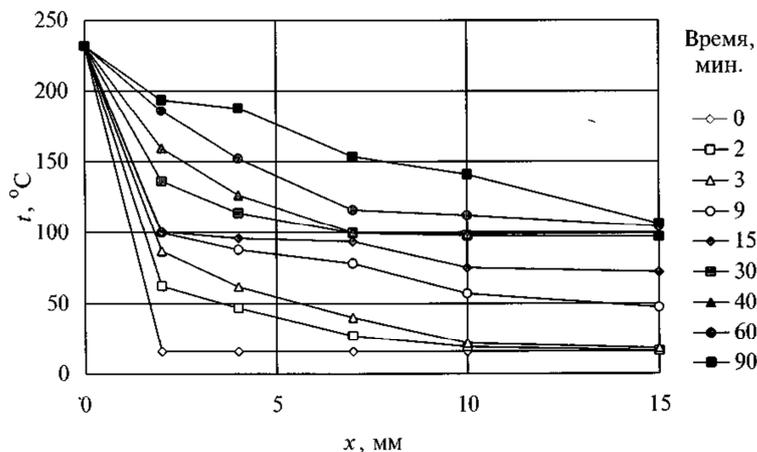


Рис. 5. Изменение температуры древесины при влажности $W = 70,2\%$ на различном удалении от греющей поверхности [4, с. 3–6]

Для установления указанной зависимости необходимо решить обратную задачу теплопроводности с учетом экспериментальных температурных полей, начальных и граничных условий, т.е. определить коэффициент температуропроводности среды.

Задача сводилась к решению простого уравнения теплопроводности для полубесконечной среды при граничных условиях $T(x = 0, \tau) = T_n$, $T(x = \infty, \tau) = 0$ и начальных условиях $T(x, \tau = 0) = 0$:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}.$$

В процессе определения коэффициента применен метод интегральных балансов [5]. Для решения дифференциального уравнения было введено понятие глубины проникания $q(x)$, или глубины среды, до которой проник температурный фронт (рис. 6).

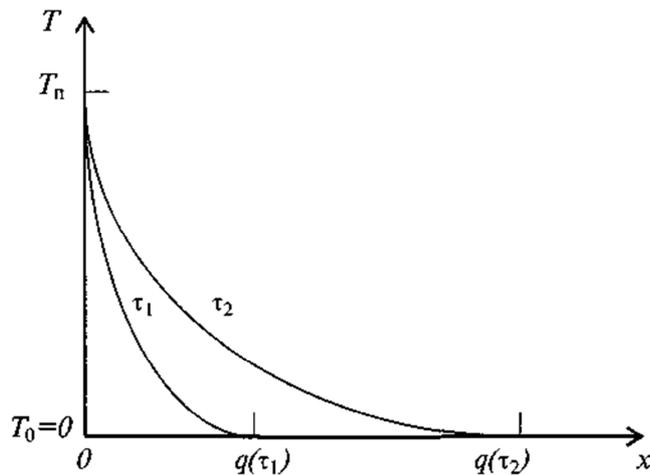


Рис. 6. Зависимость температурного фронта в полубесконечной среде от времени нагрева

Используя экспериментальные результаты (рис. 2–5), можно рассчитать значение коэффициента температуропроводности по формуле

$$a = \frac{1}{12\tau} \left[\frac{x}{1 - \sqrt{\frac{t(x, \tau) - t_0}{t_n - t_0}}} \right]^2. \quad (1)$$

Этот коэффициент изменяется от 1,7 до 10,5 мм²/мин при изменении влажности древесины от 3 до 70 % и аппроксимируется прямой вида

$$a(W) = 10,27 - 0,12W, \quad (2)$$

где W – влажность древесины, %; a – коэффициент, мм²/мин [4], [7, с. 13].

В ходе пиролиза нагревание древесины характеризуется следующими процессами: теплопередачей от греющей поверхности; массопереносом воды и пара; дополнительным выделением тепла при тлении древесины. Поэтому в выражениях (1) и (2) коэффициент a даже для сухой древесины корректнее назвать "коэффициентом теплового рассеивания". Коэффициент теплового рассеивания по физическому смыслу приближен к коэффициенту теплопроводности, при этом он учитывает также влияние массопереноса воды и пара на перенос тепла. Эмпирическая формула (2) позволяет находить коэффициент теплового рассеивания a(W) [4, с. 3–6], [7, с. 13], [5].

Заключение

В ходе работы определен оптимальный диапазон влажности древесины для производства дыма фрикционным способом. Изучена зависимость качества готовой продукции от начальной массовой доли влаги в древесине. Установлено, что процесс цветообразования копченой продукции замедляется при массовой

доле воды в древесине менее 50 %; при влажности более 50 % – возрастает. Время копчения сокращается с ростом влажности древесины при достижении равной степени цветообразования копченой продукции. На основе экспериментальных данных была решена обратная задача теплопроводности и рассчитано значение коэффициента температуропроводности. При изменении влажности древесины от 3 до 70 % этот коэффициент изменяется от 1,7 до 10,5 мм²/мин [7, с. 13], [9, с. 101–102].

Библиографический список

1. Ивашов В. И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности. В 2 ч. Ч. 2. Оборудование для переработки мяса. СПб. : ГИОРД, 2007. 457 с.
2. Хван Е. А., Гудович А. В. Копченая, вяленая и сушеная рыба. М. : Пищевая промышленность, 1978. 206 с.
3. Мезенова О. Я., Ким И. Н., Бредихин С. А. Производство копченых пищевых продуктов. М. : Колос, 2001. 207 с.
4. Бражная И. Э. Исследование процесса дымообразования во фрикционном дымогенераторе. Мурманск : МГТУ, 1997. 11 с. Деп. во ВНИЭРХ 21.11.97, № 1317-рх97.
5. Михайлов Ю. А., Глазунов Ю. Т. Вариационные методы в теории нелинейного тепло- и массопереноса. Рига : Зинатне, 1985. 220 с.
6. Леванидов И. П., Ионас Г. П., Слущкая Т. Н. Технология соленых, копченых и вяленых рыбных продуктов. М. : Агропромиздат, 1987. 160 с.
7. Бражная И. Э. Разработка ароматизаторов для пресервов на основе совершенствования процесса генерации дыма фрикционным способом : автореф. ... канд. техн. наук. Мурманск, 1998. 25 с.
8. Бражная И. Э., Ершов А. М. Результаты исследований процесса генерации дыма во фрикционном дымогенераторе // Сб. тезисов 6-й науч.-техн. конф. МГТУ. Мурманск : МГТУ, 1995. Ч. 1. С. 102–103.
9. Бражная И. Э., Глазунов Ю. Т. О решении одной обратной задачи теплопроводности // Сб. тезисов 7-й науч.-техн. конф. МГТУ. Мурманск : МГТУ, 1996. Ч. 1. С. 101–102.

References

1. Ivashov V. I. Tehnologicheskoe oborudovanie predpriyatij myasnoy promyshlennosti [Process equipment of meat industry enterprises]. V 2 ch. Ch. 2. Oborudovanie dlya pererabotki myasa. SPb. : GIORD, 2007. 457 p.
2. Hvan E. A., Gudovich A. V. Kopchenaya, vyalenaya i sushenaya ryba [Smoked, semi-dried, and dried fish]. M. : Pischevaya promyshlennost, 1978. 206 p.
3. Mezenova O. Ya., Kim I. N., Bredihin S. A. Proizvodstvo kopchenyh pischevykh produktov [Production of smoked food products]. M. : Kolos, 2001. 207 p.
4. Brazhnaya I. E. Issledovanie protsesssa dymoobrazovaniya vo friktsionnom dymogeneratorе [Investigation of smoke in the friction smoke generator]. Murmansk : MGTU, 1997. 11 p. Dep. vo VNIERH 21.11.97, N 1317-rh97.
5. Mihaylov Yu. A., Glazunov Yu. T. Variatsionnyie metody v teorii nelineynogo teplo- i massoperenosa [Variational methods in the theory of nonlinear heat- and mass transfer]. Riga : Zinatne, 1985. 220 p.
6. Levanidov I. P., Ionas G. P., Slutskaya T. N. Tehnologiya solenyh, kopchenyh i vyalenyh rybnyh produktov [Technology of salted, smoked and dried fish products]. M. : Agropromizdat, 1987. 160 p.
7. Brazhnaya I. E. Razrabotka aromatizatorov dlya preservov na osnove sovershenstvovaniya protsesssa generatsii dymа friktsionnym sposobom [Development of preserve flavors on the basis of improving generation of smoke friction manner]: avtoref. ... kand. tehn. nauk. Murmansk, 1998. 25 p.
8. Brazhnaya I. E., Ershov A. M. Rezultaty issledovaniy protsesssa generatsii dymа vo friktsionnom dymogeneratorе [The results of research of smoke generation in the friction smoke generator] // Sb. tezisov 6-y nauch.-tehn. konf. MGTU. Murmansk : MGTU, 1995. Ch. 1. P. 102–103.
9. Brazhnaya I. E., Glazunov Yu. T. O reshenii odnoy obratnoy zadachi teploprovodnosti [On solution of inverse heat conduction problem] // Sb. tezisov 7-y nauch.-tehn. konf. MGTU. Murmansk : MGTU, 1996. Ch. 1. P. 101–102.

Сведения об авторах

Бражная Инна Эдуардовна – ФГБОУ ВПО "Мурманский государственный технический университет", Естественно-технологический институт, кафедра технологий пищевых производств, канд. техн. наук, доцент; e-mail: brain67@mail.ru

Brazhnaya I. E. – FSEI HPE "Murmansk State Technical University", Institute of Natural Science and Technology, Department of Food Production Technology, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: brain67@mail.ru

Глазунов Юрий Трофимович – ФГБОУ ВПО "Мурманский государственный технический университет", Естественно-технологический институт, кафедра технологий пищевых производств, д-р техн. наук, профессор; e-mail: glazunovjut@mstu.edu.ru

Glazunov Yu. T. – FSEI HPE "Murmansk State Technical University", Institute of Natural Science and Technology, Department of Food Production Technology, Dr of Tech. Sci., Professor; e-mail: glazunovjut@mstu.edu.ru

Ершов Александр Михайлович – ФГБОУ ВПО "Мурманский государственный технический университет", Естественно-технологический институт, кафедра технологий пищевых производств, д-р техн. наук, профессор; e-mail: ershovam@mstu.edu.ru

Ershov A. M. – FSEI HPE "Murmansk State Technical University", Institute of Natural Science and Technology, Department of Food Production Technology, Dr of Tech. Sci., Professor; e-mail: yershovam@mstu.edu.ru