

УДК 664.9.047

*О.Е. Губа, Г.Б. Абуова, Е.М. Дербасова*  
*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет*

## **РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ВЫСУШИВАЕМОЙ ЧАСТИЦЕ ПРИ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКЕ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПУТЕМ РЕАЛИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА**

В статье представлена разработанная математическая модель тепломассопереноса с целью расчета температур в объеме высушиваемых дисперсных частиц при распылительной сушке термолабильных материалов и реализации различных температурных режимов для управления качеством продуктов. Математическая модель основана на решении методом конечных разностей дифференциального уравнения переноса тепла с учетом свойств материала, режимных параметров и кинетики процесса сушки.

Конвективная сушка, термолабильные материалы, температурное поле, математическая модель тепломассопереноса.

The article presents a mathematical model of heat and mass transfer aimed at calculation of temperature for the dried particles in spray drying of thermolabile materials as well as implementation of different temperature modes for product quality management. Mathematical model is based on finite difference solution of a differential equation of heat transfer, taking into consideration material properties, operating conditions and drying kinetics.

Convective drying of thermolabile materials, temperature field, mathematical model of heat and mass transfer.

### **Введение**

Стадия сушки энергоемка и в значительной степени определяет стоимость готового продукта, а также оказывает влияние на качественные показатели товарной продукции. Для обеспечения высокого качества сухих дисперсных материалов определяющее значение имеет режим сушки. Потеря качества термолабильных продуктов, как и большинства биополимерных продуктов, при сушке происходит в результате их нагрева выше 52–60 °С, при которой происходит термическое разложение ценных компонентов. В качестве объектов исследований приняты типичные термолабильные материалы: яичный белок, желток и меланж. Для обеспечения соответствия качественных показателей требованиям ГОСТ [9], температуру данных продуктов при сушке не рекомендуется превышать более 48–60 °С [7], [8], [13], [19], [22], [23].

В производственной практике распространенным приемом повышения эффективности распылительных сушильных комплексов при уменьшении расхода сушильного агента, снижении энергозатрат и удельных габаритов сушильной камеры считается повышение исходной температуры сушильного агента и/или начальной температуры продукта, подаваемого на сушку. Применительно к термолабильным продуктам этот прием повышения эффективности сушильной установки вступает в противоречие с необходимостью обеспечения высокого качества конечных продуктов.

Таким образом, качественную сушку термолабильных продуктов следует выполнять, строго кон-

тролируя и регулируя все параметры процесса, включая температуру объектов обезвоживания [4], [5], [12]. Определить поля температур в витающих тонкодисперсных частицах при значительной интенсивности процесса промышленной распылительной сушки экспериментально невозможно, а значит, очевидна необходимость реализации математической модели тепломассопереноса с целью расчета температур в каждой пространственной точке распыленных частиц обезвоживаемых материалов в течение процесса сушки для внедрения рациональных режимов и управления качеством продукции.

### **Основная часть**

При внедрении рациональных режимов и конструкций аппаратов для сушки, в первую очередь, надлежит обеспечить на практике условия для получения требуемых технологических характеристик высушиваемого материала [4], [5], [11]. Оценка эволюции нестационарных полей температур в высушиваемом материале возможна путем решения системы дифференциальных уравнений влаго- и тепломассопереноса [3], [10], [16], [17] и др. Аналитически решить данную систему и с высокой точностью рассчитать поля температур затруднительно без ряда допущений.

Реализация математической модели тепломассопереноса проводилась с учетом положений и допущений, аргументированных в работах И.Ю. Алексаняна [1], [2] и др., посвященных разработке численно-аналитической методики определения коэффициентов молярного переноса пара и массопроводности

в неизотермических условиях с учетом режима и кинетики интенсивного обезвоживания, термодинамических параметров взаимодействия объекта сушки с водой, комплекса физико-химических свойств материала и др.

Разработанная И.Ю. Александяном [1], [3] методика основана на 3 допущениях:

- в поверхностном слое материала от центра и до периферии частицы продукта происходит линейная релаксация избыточного давления, при этом, чем ближе координата к поверхности частицы, тем меньшее сопротивление оказывает капиллярно-пористая система диффузии влаги к поверхности;
- избыточное давление соответствует температуре насыщения только для внутренних слоев, где не происходит резкой релаксации давления, что подтверждено опытным путем в работах П.Д. Лебедева [14], [15];
- преимущественное значение градиента давления для диффузии влаги не исключает возможность движения влаги (преимущественно в виде пара) под действием градиента температуры.

При построении модели полагаем, что в ходе конвективной распылительной сушки осуществляется равномерный объемный подвод энергии для шарообразной частицы малого постоянного диаметра  $d = 20..30$  мкм. Следовательно, в качестве первой координаты  $x$ , характеризующей высушиваемую частицу и от которой зависит искомая температурная функция  $t(x, y)$ , можно принять ее диаметр  $d$ , мкм, то есть  $x = 0..d$ . При моделировании можно не использовать полярные координаты, так как эволюция температур не зависит от угла и направления энергоподвода. За вторую координату при составлении разностной сетки и решении дифференциального уравнения принимаем влажность продукта  $W$ , кг/кг (или содержание сухих веществ  $c$ , кг/кг), которая связана установленной в ходе экспериментов функциональной зависимостью со временем процесса сушки  $\tau = 0.. \tau_c$ , с. Координата  $W = W_n..W_k$  (или  $c = C_n..C_k$ ). Начальное значение координаты  $W$  (или  $c$ ), соответствующее началу процесса сушки в начальный момент времени при  $\tau = 0$ :  $W_n$  ( $C_n = 1 - W_n$ ). Конечное значение координаты  $W$  (или  $c$ ), соответствующее концу процесса при  $\tau = \tau_c$ :  $W_k$  (или  $C_k = 1 - W_k$ ). На рис. 1 представлена схема к математической модели тепломассопереноса при распылительной сушке.

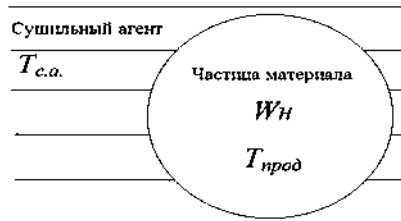
В случае объемного энергоподвода дифференциальное уравнение переноса тепла при одномерной задаче имеет вид [16]:

$$\begin{aligned} c \cdot \rho(x, t, W) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(x, t, W) \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \\ + \varepsilon \cdot r(x, t, W) \cdot \rho(x, t, W) \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} + \\ + W'(x, t, W), \end{aligned} \quad (1)$$

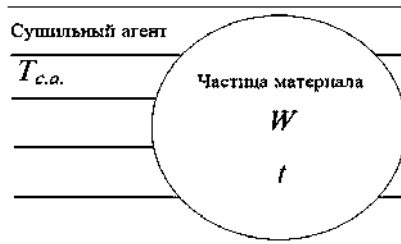
где  $x$  – координата глубины частицы, м;  $\lambda(x, t, W)$  – теплопроводность материала, Вт/(м·К);  $c \cdot \rho(x, t, W) = c_v$  – объемная теплоемкость материала, Дж/(К·м³);  $\rho(x, t, W)$  – плотность материала, кг/м³;  $r(x, t, W)$  – теп-

лота испарения, Дж/кг – определенная при термодинамическом анализе механизма внутреннего массопереноса;  $t$  – температура в любой пространственной точке материала, К;  $\varepsilon = 1$  – коэффициент фазовых превращений, так как влагоперенос в процессе высокоинтенсивной распылительной сушки происходит преимущественно в виде пара при изотропности структуры [1], [3];  $\partial W / \partial \tau$  – скорость сушки, кг/(кг·с) – с учетом изотропности структуры [1], [3], можно заменить на  $\partial \bar{W} / \partial \tau$  – дифференциальное изменение средней по слою влажности;  $W'(x, t, W) = 0$  – внутренний источник тепла отсутствует.

Начало процесса:  $\tau = 0$  с;  $W = W_n$ ;  $t = T_{\text{прод}} = \text{const}$



Процесс сушки:  $0 < \tau < \tau_c$ ;  $W_k < W < W_n$ ;  $t \neq \text{const}$



Конец процесса:  $\tau = \tau_c$ ;  $W = W_k$ ;  $t \approx \text{const}$



Рис. 1. Схема к математической модели тепломассопереноса

Структура частиц высушиваемого материала изотропна, и поле влажности равномерно по слою, а следовательно, теплофизические характеристики практически не зависят от координаты  $x$ . Таким образом, если вынести  $\bar{\lambda}(t, W)$  за знак дифференциала и разделить уравнение на  $\bar{c} \cdot \rho(t, W)$ , то получим:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \bar{a}(t, W) \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{r(t, W) \bar{\rho}(t, W)}{\bar{c} \cdot \rho(t, W)} \cdot \frac{\partial \bar{W}}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где  $\bar{a}(t, W) = \frac{\bar{\lambda}(t, W)}{\bar{c} \cdot \rho(t, W)}$  – коэффициент температуропроводности, м²/с.

После математических преобразований и далее опускаем знак среднего и варьируемого параметров выражение (2) принимает вид:

$$\frac{\partial t}{\partial W} = \frac{a}{\partial W / \partial \tau} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{r \cdot \rho}{c_v}. \quad (3)$$

Решением уравнения (3) при краевых условиях будет являться искомая температурная функция  $t = f(x, W)$ . В первоначальный момент времени  $\tau = 0$  (сразу после выхода продукта из распылителя в сушильную камеру), и, соответственно, при исходной влажности продукта  $W_n$ , температура материала всех пространственных точек распыленной частицы одинакова и соответствует  $t_0 = T_{\text{прод.}}$ . Начальные условия:  $W = W_n$ ,  $t = t_0$ . При реализации модели конечные условия предыдущего участка при текущей влажности  $W$  (распределение значений температур по диаметру частицы) являются начальными условиями для последующего участка при следующем шаговом значении влажности  $W$ .

При моделировании пренебрегаем лучистым теплообменом между поверхностями распыленных частиц, так как фактически отражателем является внешняя поверхность соседних частиц продукта, имеющих одинаковую температуру [1], [3], [18], [20].

Граничные условия для теплообмена на границе материала с сушильным агентом:

$$-\lambda(W) \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha (T_{c.a.} - t_{x=0(\text{поверх})}), \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $T_{c.a.}$  – температура сушильного агента (окружающей среды), К;  $t_{x=0(\text{поверх})}$  – температура поверхности частицы, К.

Для удобства дифференцирования при численной реализации модели заменим влажность  $W$  концентрацией сухих веществ  $s$ . Уравнение относится к дифференциальным уравнениям параболического типа, для решения которых наиболее широко распространены фундаментальный метод конечных разностей. Согласно этому методу функции, заданные на континууме, представляются сеточным вектором, а дифференциальные операторы естественным образом аппроксимируются на сетке их разностными аналогами [13], [21].

В ходе комплексных исследований установлены все необходимые математические зависимости для реализации модели тепломассопереноса при конвективной распылительной сушке следующих материалов: яичный белок, яичный желток и меланж. При установленных различных режимах, включая рациональные, которые соответствуют максимально возможному съему сухого продукта с единицы объема сушильной камеры в единицу времени  $\Pi$ , кг/(м<sup>3</sup>·ч) (табл. 1), рассчитаны температурные функции по диаметру распыленной частицы и изменяющемуся во времени процессу содержанию сухих веществ в частице материала (в качестве примера на рис. 2 и 3). Реализация математической модели выполнена в

среде программного обеспечения Mathcad Professional.

Таблица 1

Максимум  $\Pi$ , время сушки и рациональные значения варьируемых параметров

| Продукт       | $\Pi$ ,<br>кг/(м <sup>3</sup> ·ч) | $\tau$ , с | $T_{c.a.}$ , К | $T_{\text{прод.}}$ ,<br>К |
|---------------|-----------------------------------|------------|----------------|---------------------------|
| Яичный белок  | 1,04                              | 5,6        | 473            | 298                       |
| Яичный желток | 2,23                              | 3,9        | 473            | 298                       |
| Яичный меланж | 1,67                              | 5,9        | 458            | 298                       |

Помимо традиционной прямоточной распылительной сушки дополнительно предложена двухзонная рационализация процесса обезвоживания при комбинации прямотока, на создание которого расходуется 2/3 потока сушильного агента и дополнительной перекрестной подачи 1/3 общего расхода сушильного агента в периоде падающей скорости сушки [4], [5], [12]. В сравнении с традиционным прямоточным контактом предложенная организация процесса позволяет создать более активную нестационарную аэродинамическую обстановку взаимодействия фазовых потоков в сушильной камере, что обуславливает прирост показателя  $\Pi$ , кг/(м<sup>3</sup>·ч) (табл. 2). Соотношение расходов принято на основании результатов исследования кинетики сушки и серии экспериментов.

Таблица 2

Удельная производительность при различной организации процесса распылительной сушки

| Продукт \ Параметр | $\Pi$ ,<br>кг/(м <sup>3</sup> ·ч);<br>прямоток | $\Pi$ , кг/(м <sup>3</sup> ·ч);<br>прямоток и<br>перекрест-<br>ный ток | Прирост,<br>% |
|--------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Яичный белок       | 1,04                                           | 1,104                                                                  | 6,15          |
| Яичный желток      | 2,23                                           | 2,362                                                                  | 5,92          |
| Яичный меланж      | 1,67                                           | 1,73                                                                   | 3,59          |

Анализ полей распределения температур (рис. 2 и 3) и численные значения температур в пространственных точках частиц в процессе распылительной сушки позволяют сделать вывод о незначительных температурных перепадах в материале в ходе обезвоживания. На первоначальной стадии прогрева температура по диаметру частиц повышается, а в период интенсивного удаления свободной влаги в области максимальных значений скорости сушки материал практически не нагревается, следовательно, все тепло от сушильного агента, сообщаемое материалу, полезно расходуется на испарение влаги. Этот факт обоснован еще в классических работах по сушке [10], [16].

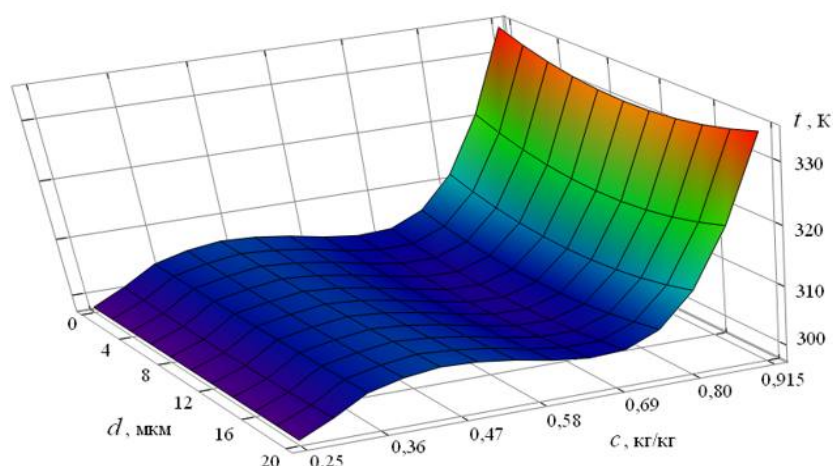


Рис. 2. Поле распределения температур по диаметру частицы меланжа в процессе распылительной сушки (режимные параметры:  $T_{prod} = 298K$ ;  $T_{c.a.} = 458K$ ; прямоток)

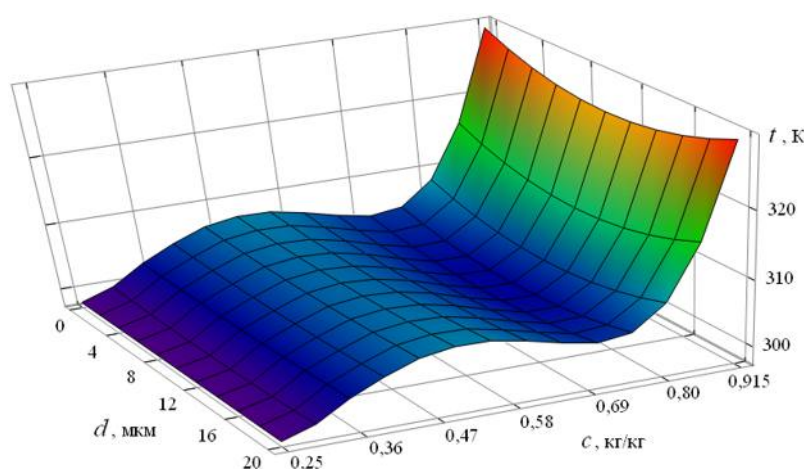


Рис. 3. Поле распределения температур по диаметру частицы меланжа в процессе распылительной сушки (режимные параметры:  $T_{prod} = 298K$ ;  $T_{c.a.} = 458K$ ; прямоток – перекрестный ток)

Далее наблюдается стремительный рост температуры материала по мере увеличения содержания сухих веществ до максимальных значений температур в конце процесса сушки (рис. 2 и 3). Аналогичный характер изменения температуры наблюдается по всему сечению частицы. Рост температуры свидетельствует о переходе к удалению преимущественно адсорбционной влаги во втором периоде сушки. Прогрев материала интенсивней на поверхности частиц (рис. 2 и 3), что свидетельствует об углублении зоны испарения вглубь частицы и подтверждает ранее сделанные выводы о механизме влагопереноса и согласуется с классическими работами по сушке [10], [16] и др.

При тестировании разработанных режимов (табл. 1) произведена оценка адекватности модели по температуре поверхности частицы, которая экспериментально измерялась в реальном процессе сушки в слое порошка готового продукта при его конечной влажности. Отклонение расчетных данных и сведений, полученных экспериментально при различных режимах составило не более 10 %.

Анализ качественных показателей сухих яичных продуктов, полученных при рациональных режимах (табл. 1) в ходе их тестирования, показал соответст-

вие образцов требованиям ГОСТ Р 53155-2008 «Продукты яичные жидкие и сухие пищевые».

### Выводы

Предложена и обоснована при моделировании двухзонная рационализация распылительной сушки при комбинации прямотока и дополнительной перекрестной подачи сушильного агента в периоде падающей скорости сушки [4], [5], [12]. Сравнение полей распределения температур при рациональных режимах для вариантов прямотока (рис. 1) и комбинации прямотока – перекрестного тока (рис. 2) свидетельствует о снижении температур в пространственных точках объектов сушки при создании более активной аэродинамической обстановки взаимодействия потоков. Снижение температур материала в результате двухзонной сушки при комбинации прямотока – перекрестного тока обуславливает более высокое качество получаемых порошков термолabileльных продуктов. Таким образом, организация рациональной двухзонной сушки для термолabileльных продуктов позволяет не только увеличить удельную производительность сушки, но и повысить качественные показатели товарных продуктов [4], [5], [11], [12].

Средние по сечению материала значения температур термолабильных продуктов не превышали рекомендованных 333 К, что обуславливает сохранность качества при сушке, а следовательно, разработанные режимы могут быть рекомендованы для внедрения в производственную практику.

На основе предложенной модели тепломассопереноса можно разработать программное обеспечение для программно-аппаратных комплексов с целью контроля параметров и управления режимами при распылительной сушке.

#### Литература

1. Алексанян И.Ю. Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2001. 52 с.
2. Алексанян И.Ю. Физико-математическая модель процесса комбинированной сушки продуктов в различном агрегатном состоянии и численно-аналитический метод расчета эволюции полей температур, давлений и определения коэффициентов теплопроводности и молярного переноса пара с учетом динамики обезвоживания на основе аппроксимации кривых кинетики сушки // Труды второй Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2005»: тез. докл. М., 2005. Т. 1. С. 175–179.
3. Алексанян И.Ю., Буйнов А.А. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование. Астрахань, 2004. 380 с.
4. Алексанян И.Ю., Максименко Ю.А., Губа О.Е., Феклунова Ю.С. Распылительная сушилка // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. Воронеж, 2015. № 2 (6). С. 55–59.
5. Алексанян И.Ю., Максименко Ю.А., Губа О.Е., Феклунова Ю.С. Распылительная сушилка // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. Воронеж, 2015. № 1 (5). С. 61–66.
6. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М., 2003. 632 с.
7. Бессарабов Б.Ф., Бондарев Э.И., Столяр Т.А. Птицеводство и технология производства яиц и мяса птиц. СПб., 2005. 352 с.
8. Бессарабов Б.Ф., Жаворонкова Л.Д., Столяр Т.А., Раецкий А.В. Птицеводство и технология производства яиц и мяса птицы. М., 1994. 271 с.
9. ГОСТ Р 53155-2008 «Продукты яичные жидкие и сухие пищевые. Технические условия».
10. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М., 1975. 527 с.
11. Губа О.Е., Максименко Ю.А. Исследование кинетики распылительной сушки меланжа с учетом влияния основных факторов на интенсивность тепломассообмена // Естественные и технические науки. М., 2014. № 7 (75). С. 72–74.
12. Губа О.Е. Совершенствование и научное обоснование способа сушки яичных продуктов : дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2015. 220 с.
13. Кочиш И.И., Петраш М.Г., Смирнов С.Б. Птицеводство. М., 2003. 407 с.
14. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок. М. ; Л., 1963. 320 с.
15. Лебедев П.Д. Высокотемпературная сушка материалов под действием внутреннего градиента давлений

пара // Труды Московского энергетического института. 1958. Вып. 30. С. 169–178.

16. Лыков А.В. Теория сушки. М., 1968. 471 с.
17. Лыков А.В. Тепломассообмен. М., 1978. 478 с.
18. Максименко Ю.А. Совершенствование тепломассообменных процессов при сушке кормовых дрожжей в диспергированном состоянии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2005. 21 с.
19. Митрофанов Н.С. Переработка птицы. М., 1990. 303 с.
20. Петровичев О.А. Исследование тепломассообменных и гидромеханических процессов при распылительной сушке пектинового экстракта: дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2007. 172 с.
21. Поттер Д. Вычислительные методы в физике. М., 1975. 386 с.
22. Сметнев С.И. Птицеводство. М., 1978. 304 с.
23. Третьяков Н.П., Бессарабов Б.Ф. Переработка продуктов птицеводства. М., 1985. 287 с.

#### References

1. Aleksanian I.Iu. *Razvitie nauchnykh osnov processov vysokointensivnoi sushki produktov zhivotnogo i rastitel'nogo proishozhdeniia* [Development of scientific bases of high-intensity drying processes of animal and plant products. Doct. Dis.]. Moscow, 2001, 52 p.
2. Aleksanian I. Iu. *Fiziko-matematicheskaya model' processa kombinirovannoi sushki produktov v razlichnom agregatnom sostoianii i chislenno-analiticheskii metod rascheta evoliucii polei temperatur, davlenii i opredeleniia koeffitsientov potentsialoprovodnosti i moliarnogo perenosa para s ucheto dinamiki obezvzhivaniia na osnove approksimacii krivykh kinetiki sushki* [Physical and mathematical model of the process of drying the combined product in a different state of aggregation and numerical-analytical method for calculating the evolution of the temperature field, pressure and determination of potential conductivity and molar ratios and vapor transport, taking into account the dynamics of dehydration based on the approximation of the drying kinetics curves]. *Trudy vtoroi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii «Sovremennye energosberegaiushhie teplovye tehnologii (sushka i teplovye processy) SJeTT-2005»* [Proceedings of the Second International Scientific and Practical Conference "Modern energy-saving heat technology (drying and thermal processes), SETT 2005"]. Moscow, 2005, T. 1, pp. 175–179.
3. Aleksanian I.Iu., Buinov A.A. *Vysokointensivnaia sushka pishhevyykh produktov. Penosushka. Teoriia. Praktika. Modelirovanie. Monografiia* [High intensity drying foodstuffs. Puffing. Theory. Practice. Modeling]. Astrahan', 2004, 308 p.
4. Aleksanian I.Iu., Maksimenko Iu.A., Guba O.E., Feklunova Iu.S. *Raspylitel'naia sushilka [Spray Dryer]. Tehnologii pishhevoi i pererabatyvaiushhei promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniia* [Technology and food processing industry, agro-industrial complex – healthy food]. Voronezh, 2015, № 2 (6), pp. 55–59.
5. Aleksanian I.Iu., Maksimenko Iu.A., Guba O.E., Feklunova Iu.S. *Raspylitel'naia sushilka [Spray Dryer]. Tehnologii pishhevoi i pererabatyvaiushhei promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniia* [Technology and food processing industry agro-industrial complex – healthy food]. Voronezh, 2015, № 1 (5), pp. 61–66.
6. Bahvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. *Chislennye metody* [Numerical methods]. Moscow, 2003. 632 p.
7. Bessarabov B.F., Bondarev Ie.I., Stoliar T.A. *Pticevodstvo i tehnologii proizvodstva iaic i miasa ptic* [Poultry and technology of production of eggs and poultry]. St-Peterburg, 2005, 352 p.
8. Bessarabov B.F., Zhavoronkova L.D., Stoliar T.A., Raetskii A.V. *Pticevodstvo i tehnologii proizvodstva iaic i miasa*

*ptic* [Poultry and technology of production of eggs and poultry]. Moscow, 1994, 271 p.

9. GOST R 53155-2008 «*Produkty iaichnye zhidkie i suhie pishhevye. Tehnicheskie usloviia*» [GOST R 53155-2008 "Egg products, liquid and dry food. Specifications"].

10. Ginzburg A.S. *Osnovy teorii i tehniki sushki pishhevyykh produktov* [Fundamentals of the theory and technology of food drying]. Moscow, 1975, 527 p.

11. Guba O.E., Maksimenko Iu.A. Issledovanie kinetiki raspylitel'noi sushki melanzha s uchetom vlianiia osnovnykh faktorov na intensivnost' teplomassoobmena [Kinetics Study of spray drying melange with the influence of the main factors on the intensity of heat and mass transfer]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and Technical Sciences]. Moscow, 2014, № 7 (75), pp. 72–74.

12. Guba O.E. *Sovershenstvovanie i nauchnoe obosnovanie sposoba sushki iaichnykh produktov : dis. ... kand. Tehn. nauk* [Improving the scientific basis and method for drying egg products: Doct. dis.]. Voronezh, 2015, 220 p.

13. Kochish I.I., Petrash M.G., Smirnov S.B. *Pticevodstvo* [Aviculture]. Moscow, 2003, 407 p.

14. Lebedev P.D. *Raschet i proektirovanie sushil'nykh ustanovok* [Calculation and design of dryers]. Moscow ; Leningrad, 1963, 320 p.

15. Lebedev P.D. Vysokotemperaturnaia sushka materialov pod deistviem vnutrennego gradienta davlenii para [High-

temperature drying of materials under the influence of the internal pressure gradient pair]. *Trudy Moskovskogo energeticheskogo instituta* [Works Dept]. 1958, v. 30, pp. 169–178.

16. Lykov A.V. *Teoriia sushki* [Drying Theory]. Moscow, 1968, 471 p.

17. Lykov A.V. *Teplomassobmen* [Heat and Mass Transfer]. Moscow, 1978, 478 p.

18. Maksimenko Iu.A. *Sovershenstvovanie teplomassoobmennyykh processov pri sushke kormovykh drozhzhei v dispergirovannom sostoianii* [Improving the heat and mass transfer processes at drying of fodder yeast in a dispersed state. Doct. Dis.]. Astrahan, 2005, 21 p.

19. Mitrofanov N.S. i dr. *Pererabotka pticy* [Poultry processing]. Moscow, 1990, 303 p.

20. Petrovichev O.A. *Issledovanie teplomassoobmennyykh i gidromekhanicheskikh processov pri raspylitel'noi sushke pektinovogo ekstrakta* [Research heat and mass transfer and hydro processes in spray-dried extract pectin: Doct. dis.]. Astrahan, 2007, 172 p.

21. Potter D. *Vychislitel'nye metody v fizike* [Computational methods in physics]. Moscow, 1975, 386 p.

22. Smetnev S.I. *Pticevodstvo* [Aviculture]. Moscow, 1978, 304 p.

23. Tret'iakov N.P., Bessarabov B.F. *Pererabotka produktov pticevodstva* [Processing of poultry products]. Moscow, 1985, 287 p.

УДК 677.021:62.523

**Д.Н. Зверев**

*Костромская городская телефонная сеть,*

**В.Г. Дроздов**

*Костромской государственной технологической университет*

## АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ СТЕБЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Авторами предложен метод контроля толщины льнотресты и создана система, позволяющая осуществлять автоматический контроль за толщиной стеблей льна на всех технологических переходах и этапах работы мяльно-трепального агрегата.

Автоматизация, мяльно-трепальный агрегат, система технического зрения, лазерная система сканирования, льнотреста, толщина слоя.

The authors offer a control method of thickness of flax stock and create a system allowing to exercise flaxstems' thickness automatic control on all technological steps and stages of work of the brake – tow scutcher unit.

Automation, brake – tow scutcher unit, machine vision system, laser scanning system, flax stock, layer thickness.

### Введение

Задача исследования состояла в разработке системы автоматического контроля толщины слоя стеблей. При этом общая система управления мяльно-трепального агрегата (МТА) будет получать информацию о технологических параметрах исследуемого материала – льнотресты – и формировать управляющие воздействия на отдельные блоки системы управления МТА [1], [2]. Для реализации этой задачи были использованы компьютер, видеокамера, лазерный диод красного спектра.

### Основная часть

Вся информация о высоте слоя, считываемая системой технического зрения (СТЗ), а также информация о влажности слоя, другие его технологические

параметры, такие как длина и ширина слоя, растянутость, углы дезориентации, поступает на программно-логический контроллер (ПЛК), который вырабатывает оптимальные режимы работы МТА и посылает соответствующие сигналы на блоки управления процессами получения волокна.

Для определения толщины слоя недостаточно использования одной или нескольких камер, входящих в уже существующие системы технического зрения [4], [5]. Информация, поступающая с такого вида системы, будет неточной, не сможет в полном объеме отображать выводы о толщине слоя. Поэтому в предлагаемой системе в совокупности с видеодатчиками используется лазерный диод красного спектра, который позволяет получить более точные значения толщины слоя, чем в предыдущих исследованиях [3].