

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3-197-203>

Поступила 12.06.2021

Поступила после рецензирования 14.08.2021

Принята в печать 25.09.2021

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

ОБЕЗВОЖИВАНИЕ СЕМЯН КОНОПЛИ МЕТОДОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ МИКРОНИЗАЦИИ

Зверев С. В.

Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

конопляное семя, инфракрасный
нагрев, температура,
влажность, модель

АННОТАЦИЯ

В ряде случаев для снижения влажности, инактивации некоторых ферментов, повышения сохраняемости и эффективности переработки зернопродукты необходимо термообработать. Одним из методов термообработки является высокотемпературная микронизация — нагрев в потоке инфракрасного излучения. Метод удобен в условиях малых и средних предприятий. Целью работы являлось получение фактографического материала по нагреву и обезвоживанию семян конопли при нагреве в потоке инфракрасного излучения, а также моделирование процессов нагрева и обезвоживания. Получены экспериментальные зависимости температуры семян и влажности от времени нагрева при различных режимах инфракрасной термообработки. Предложены математические модели изменения температуры семян в функции времени и влагосодержания в зависимости от температуры семян и исходной влажности. Модели обезвоживания основывались на упрощенных решениях системы дифференциальных уравнений теплообмена, полученных академиком В. А. Лыковым и его учениками. По результатам экспериментов были идентифицированы коэффициенты моделей. Анализ полученных коэффициентов показал, что в рассмотренных моделях без существенной потери прогностической точности можно ограничиться одним коэффициентом. При постоянных условиях ИК-нагрева семян конопли (облученность и температура в зоне обработки) предложенные модели довольно хорошо подтверждаются экспериментальными данными. Однако на зависимость относительной влажности W/W_0 и приращения температуры $\Delta T(t)$ от времени существенно влияют условия нагрева. В то же время исходя из результатов обработки и имеющихся экспериментальных данных следует, что характер зависимости $W(\Delta T)$ определяется исходной влажностью и является инвариантным к условиям нагрева, т. е. слабо от них зависящим.

Received 12.06.2021

Accepted in revised 14.08.2021

Accepted for publication 25.09.2021

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

DESICCATION OF HEMP SEEDS BY HIGH TEMPERATURE MICRONIZATION

Sergey V. Zverev

All-Russian Scientific Research Institute for Grain and Products of its Processing, Moscow, Russia

KEY WORDS:

hemp seed, infrared heating,
temperature, humidity, model

ABSTRACT

In several cases, it is necessary to use heat treatment of cereal products to reduce moisture, inactivate some enzymes, increase storability and processing efficiency. One of the methods for heat treatment is high-temperature micronization — heating in a flow of infrared radiation. The method is convenient in the conditions of small and medium-sized enterprises. The aim of the study was to obtain the factual material regarding heating and desiccation of hemp seeds when heating in the flow of infrared radiation and modeling of the heating and desiccation processes. The experimental dependences of a seed temperature and moisture on heating time at different regimes of infrared heat treatment were obtained. Mathematical models were proposed for changes in a seed temperature as a function of time and moisture content depending on a seed temperature and the initial moisture. The desiccation models were based on simplified solutions of the system of differentiated equations of heat and mass transfer obtained by academician V. A. Lykov and his students. Model coefficients were identified by the results of the experiments. Analysis of the obtained coefficients shows that it is possible to use one coefficient in the examined models without a significant loss of the prognostic accuracy. The proposed models describe the experimental data quite well upon constant conditions of infrared heating of hemp seeds (irradiance and temperature in the treatment zone). However, heating conditions significantly affect the time dependence of the relative moisture (W/W_0) and temperature increment $\Delta T(t)$. At the same time, it follows from the processing results and available experimental data that the character of the dependence $W(\Delta T)$ is determined by the initial moisture and is stable (that is, weakly depends on heating conditions).

1. Введение

Тепловое воздействие на растительное сырье, в частности, на зерно и семена в процессе их переработки, может иметь различные цели: инактивация антипитательных веществ, обеззараживание, обезвоживание и т. п.

Обезвоживание — едва ли не самая востребованная операция в технологических процессах производства продук-

тов питания. Суть ее состоит в удалении влаги, и целью процесса является получение продукта с заданной влажностью. При этом методы и средства могут использоваться самые разнообразные: от чисто механических (как, например, центрифугирование, основанное на действии центробежных сил и свойстве текучести свободной воды) до химических. Все зависит от вида конкретного продукта и его влажности;

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зверев, С.В. (2021). Обезвоживание семян конопли методом высокотемпературной микронизации. *Пищевые системы*, 4(3), 197-203. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3-197-203>

FOR CITATION: Zverev, S.V. (2021). Desiccation of hemp seeds by high temperature micronization. *Food systems*, 4(3), 197-203. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3-197-203>

необходимость процесса определяется экономической целесообразностью и безопасностью.

На Рисунке 1 приведен один из вариантов классификации видов дегидратации (обезвоживания) в зависимости от условий протекания процесса, в том числе от вида и способа энергоподвода.

В зернопереработке наибольшее распространение находит сушка — процесс удаления влаги из продукта, основанный на тепловом воздействии, изменении агрегатного состояния воды и влагосорбционных свойств продукта. Данному вопросу посвящено огромное количество работ как теоретического, так и практического плана, рассматривающих процесс тепло- и влагопереноса, начиная от отдельных зерновок и заканчивая гигантскими зерносушилками производительностью до сотен тонн в час. Обезвоживание сопровождает любую технологическую операцию, связанную с нагревом зерна или крупы, — например, термообработку.

Влажность является важным показателем, поскольку оказывает существенное влияние на технологические характеристики и сохраняемость зернопродуктов. Потеря влаги (сушка, дегидратация, обезвоживание) при нагреве зерна (крупы) является сопутствующим, хотя и не всегда желательным процессом в производстве зернопродуктов.

В зависимости от условий можно различать изотермическую сушку и неізотермическую. Изотермическая сушка — это процесс, протекающий при постоянной температуре продукта $T = \text{const}$, при котором постоянная времени нагрева (т. е. время выхода температуры продукта на стационарный уровень) намного меньше периода термообработки). Сушка также может быть термостатированной (температура окружающей среды постоянна) и не термостатированную. В зависимости от температуры продукта сушка может быть как низко-, так и высокотемпературной. Имеет свои особенности сушка в заигроскопической и догигроскопической областях. Следует учитывать и основные методы энергоподвода — конвективный, кондуктивный, радиационный (ИК, СВЧ-излучением).

Некоторые показатели эффективности различных видов сушки, по данным ООО Techno Food Service (г. Ташкент), даны в Таблице 1.

Как видно, ИК сушка относится к экономически выгодному виду и широко используется для переработки пищевого и, в частности, зернового сырья [1–10].

Существует множество моделей, описывающих зависимость влагопотери в функции времени сушки.

Математическая модель — приближенное описание объекта реального мира, на языке математики. Одна из



Рисунок 1. Классификация способов обезвоживания

Сравнительные данные различных технологий сушки

Таблица 1

	Принцип технологии	Качество вырабатываемого продукта	Энергозатраты на испарение влаги, кВт.ч/кг	Стоимость испарения влаги, \$/кг
Инфракрасная газовая	Передача тепла ИК излучением	Качество продукта максимально близко качеству сублимационной сушки. Сохраняется до 90% исходных свойств продукта.	0,9–1,0	0,01
Сублимационная	Удаление влаги в два этапа — возгонка льда из замороженного продукта и тепловая досушка в вакууме	Сохраняется форма, цвет, органолептические свойства при минимальных потерях биоактивных веществ, прекрасно восстанавливается.	2,7–3,00	1,16
СВЧ-сушка	Генераторы тепла — диполи воды, содержащейся в продукте, который помещается в сверхвысокочастотное электромагнитное поле	Равномерный нагрев, практически не зависит от теплопроводности сушильного материала. Наиболее перспективна комбинированная сушка — конвективная подсушка и СВЧ-досушка. Специфического воздействия СВЧ-поля на продукт не обнаружено.	1,6–1,8	0,4–0,8
Конвективная	Передача тепла продукту от сушильного агента (нагретый воздух или парогазовая смесь)	Снижение теплопроводности продукта в конце сушки значительно удлиняет процесс, ухудшая качество готового продукта. Добиться стабильного качества можно за счет правильной нарезки, бланширования. Конвективным способом производят 90% сушеных продуктов.	1,8–3,0	0,06–0,12
Кондуктивная	Передача тепла продукту непосредственно от греющей поверхности	Стабильное, удовлетворяющее требованиям потребителя качество достигается при сушке белковых гидролизатов (содержащих свернутый белок), соусов с высоким содержанием крахмала, суспензий и т. д. Продукты, содержащие сахар, и термолабильные продукты (содержащие свежий белок) этим способом не сушат.	1,6–1,8	0,4–0,8

основных целей моделирования — предсказать результаты наблюдений в различных, но ограниченных, условиях функционирования объекта. В данном случае объект замещается его математической моделью, т. е. системой математических соотношений (уравнений, неравенств, логических соотношений и т. п.), которые описывают главные свойства объекта. Т.е. суть модели заключается в отображении некоторого заданного множества ΩX допустимых входных переменных X на множество значений ΩY допустимых выходных переменных Y , и в таком случае математическая модель есть некоторый математический оператор A :

$$A: X \rightarrow Y, X \in \Omega X, Y \in \Omega Y \quad (1)$$

Математически представленная модель должна отвечать трем основным требованиям: адекватность, достаточная простота и продуктивность [11]. Т.е. задача модели — верно (качественно и/или количественно) описывать свойства объекта, поддаваться анализу (при разумных трудозатратах) и включать доступные и надежные исходные данные. Эти требования взаимосвязаны и могут вступать в противоречие. Повышение адекватности может привести к усложнению модели и снижению ее продуктивности. Чрезмерное упрощение — к снижению адекватности и, соответственно, снижению точности прогностических оценок.

Критерием достоверности в вопросе адекватности модели является практика. Благодаря возможностям компьютера и программного обеспечения можно анализировать все более сложные модели.

Неадекватность модели как результат непрофессионального подхода ее разработчика может быть обусловлена недостаточностью информации о данном объекте — незнанием законов его функционирования либо отсутствием достоверных данных о значениях и связанных с ними параметрах.

Математическая модель содержит переменные входные (независимые) и выходные (зависимые) и параметры (факторы), которые связываются математическими соотношениями.

Различают модели:

1. Сосредоточенные (не включают пространственные координаты) и распределенные;
2. Статические (параметры и входные переменные не зависят от времени);
3. Динамические (зависят от времени).

В свою очередь, динамические модели делятся на стационарные (содержат параметры, не зависящие от времени) и нестационарные.

Различают два основных класса задач, связанных с математическими моделями: прямые и обратные. В первом случае все параметры модели считаются известными, и нам остается только исследовать ее поведение. Сразу отметим, что в инженерной практике такая ситуация практически не реальна.

В случае с обратными математическими моделями какие-то параметры модели неизвестны (например, не могут быть измерены явно), но их можно найти, сопоставляя поведение реальной системы с ее моделью (идентификация параметров) и используя, например, метод наименьших квадратов. К обратным задачам относится и подбор параметров модели (а в дальнейшем и реального моделируемого объекта) таким образом, чтобы она удовлетворяла каким-то заданным условиям — такие задачи возникают при проектировании систем. В последнем случае обратную задачу приходится решать дважды, сперва опираясь на имеющиеся экспериментальные данные, а потом задаваясь этими гипотетическими условиями.

Однако даже при минимальных знаниях объекта можно создать адекватную модель, используя метод черного ящика и решая обратную задачу.

Предлагаемые модели сушки относятся к динамическим стационарным моделям. Так, в работах Andreas Pujianto рассмотрено тринадцать вариантов модели сушки рыбы на открытом солнце и в сушилке [12]. Аналогичные модели использовались, например, для оценки содержания влаги в семенах Розеллы (суданской розы) и мoringи [13,14].

Практически все перечисленные модели устанавливая пропорциональную зависимость влажности продукта от времени нагрева в виде формулы:

$$M_g \sim \exp(-at), \quad (2)$$

где M_g — содержание влаги в продукте,

t — время,

a — эмпирический коэффициент, что вытекает из решения задачи тепломассопереноса, полученного А. В. Лыковым [15].

В последнее время оживился интерес к конопле, как источнику натурального волокна для текстильной промышленности, растительного масла и белка для пищевой промышленности [16,17]. Хранение семян конопли допускается при влажности не выше 11–14% (влажность воздуха около 75%) [18]. Один из вариантов переработки семян предполагает их обрушение — удаление оболочки и выделения ядра. Однако, в состоянии поставки семена плохо поддаются обрушению и измельчению. Одним из способов сушки семян конопли может стать высокотемпературная микронизация (BTM) — нагрев в потоке инфракрасного излучения. Данный метод удобен в использовании на малых предприятиях, поскольку установки компактны, просты в эксплуатации и легко адаптируются под различное сырье. Кроме того, при интенсивном энергоподводе имеет место градиент температуры, что позволяет прогревать оболочки зерна до более высоких температур, чем при нагревании сердцевин.

Поскольку, равновесное влажность при комнатной температуре у семян конопли существенно ниже, чем, например, у пшеницы, т. е. адсорбционный потенциал является более низким), эти семена должны легче десорбировать влагу при сушке [19].

Температурный диапазон денатурации белка конопли составляет 85–95 °C и сопоставляется с соответствующим диапазоном для зерна бобовых культур [20].

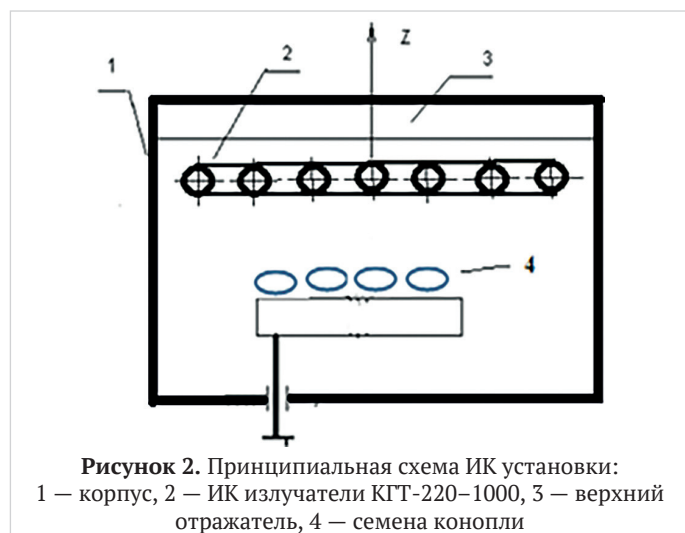
Целью исследований в данной работе являлось получение фактографических данных и построение модели нагрева и обезвоживания нативных семян конопли при нагреве в потоке ИК излучения.

2. Объекты и методы

В качестве объекта исследований использовались семена конопли, предоставленные Федеральным научным центром лубяных культур (Тверь, Россия).

Изучения процесса термообработки семян конопли проводились при помощи лабораторной установки. Принципиальная схема ИК установки представлена на Рисунке 2.

В качестве источника ИК излучения использовались кварцевые галогеновые лампы КГТ-220–1000. Коробчатая конструкция установки образует ограниченное пространство вокруг ИК — излучателей. Варьируя числом излучателей, можно менять их суммарную мощность и облученность в рабочей зоне. Кроме того, имелась возможность изменять высоту излучателей над продуктом, т. е. объем пространства рабочей зоны, что также приводит к изменению облученности и температуры среды. Облученность рассчитывалась по программе в среде «Wolfram Mathematica 10».



Семена размещались на поддоне монослоем и помещались в зону обработки на фиксированный период времени.

Температуру семян замеряли с помощью термопары (Мультиметр ТЕК DT 838), помещая их после нагрева в термоизолированную емкость [1].

Исходная влажность определялась по ГОСТ 10856-96 [21], текущую — по убыли влаги из навески по формуле:

$$W = 100 (W_0 / 100 - \Delta m / m_0) / (1 - \Delta m / m_0) \quad (3)$$

где:

W_0 — исходная влажность, %,
 m_0 — исходная масса навески, г,
 Δm — потеря массы навески, г.

Масса навесок определялась на электронных весах (модели МАССА ВК-300.1) с точностью 0,01 г.

В Таблице 2 даны условия нагрева семян конопли, примененные при получении эмпирических зависимостей изменения их температуры $T(t)$ и влажности $W(t)$ от времени t .

Таблица 2

Режимы нагрева семени конопли

Номер на графиках	Исходная влажность W_0 , %	Исходная температура T_0 , °C	Температура среды T_c , °C	Облученность E , кВт/м ²
1	5.4	24	235	18
2	10.3	22	225	18
3	10.3	22	242	12
4	13.1	24	225	18
5	13.1	24	160	12

Идентификация коэффициентов моделей проводилась с помощью программы TableCurve 3D v4.01 и TableCurve 2D v5.01.

3. Результаты и обсуждение

На Рисунке 3 и Рисунке 4 представлены графики зависимости температуры и влажности семян конопли от времени нагрева в потоке инфракрасного излучения.

Время термообработки ограничивается началом растрескивания семян, их подсаживанием на поддоне, сопровождаемое характерным звуком.

Как видно из Рисунка 3 процесс термообработки протекает в переходный период нагрева семян. На этом этапе влажность семян существенно снижается, что видно из Рисунка 4. Поскольку температура семян функционально

связана со временем нагрева, представляет интерес зависимость влажности семян от их текущей температуры.

Зависимости влажности семян конопли от их текущей температуры при ИК нагреве даны на Рисунке 5.

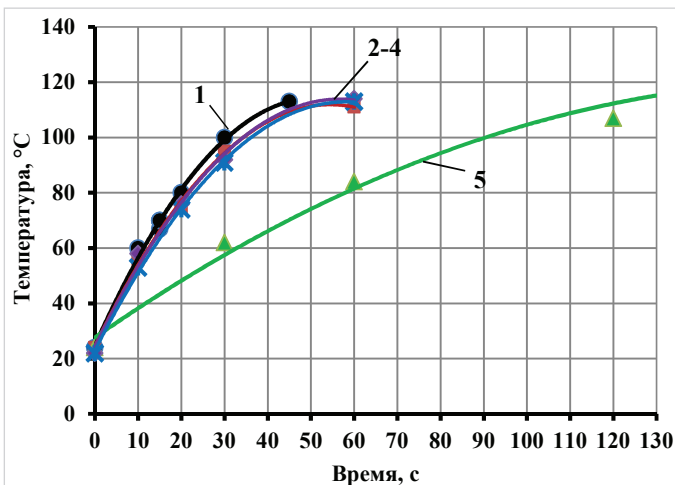


Рисунок 3. Влияние времени нагрева на температуру семян конопли при различных условиях нагрева (Таблица 2)

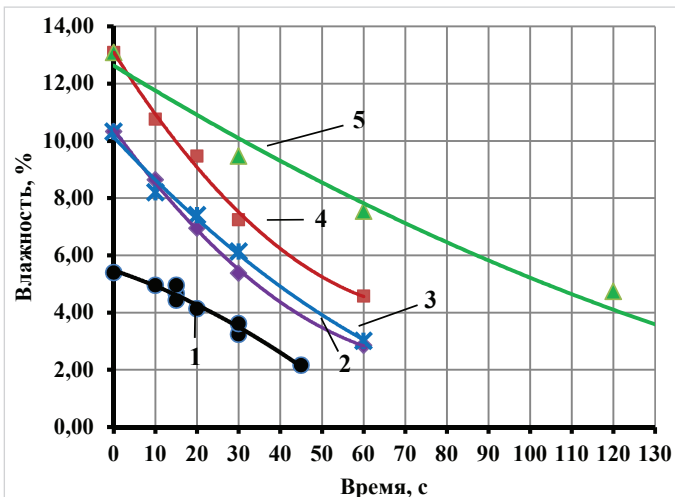


Рисунок 4. Влияние времени нагрева на влажность семян конопли при различных условиях нагрева (Таблица 2)

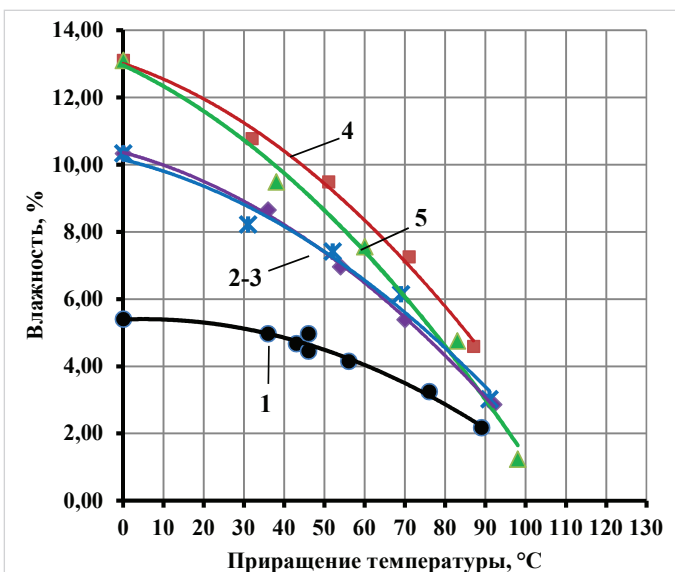


Рисунок 5. Зависимость влажности семян конопли от их температуры при различных условиях нагрева (Таблица 2)

На графиках Рисунка 5 просматривается функциональная зависимость текущей влажности семян от их текущей температуры.

Модель нагрева

Зависимость, описывающая изменение температуры в процессе нагрева, в результате решения системы дифференциальных уравнения тепло- и массопереноса, в том числе и с внутренним источником тепла, получена А. В. Лыковым и его учениками в виде экспоненциального ряда вида [15].

$$\Delta T / \Delta T_{\infty} = a_0 + a_1 \exp(-b_1 t) + a_2 \exp(-b_2 t) + \dots (4)$$

где:

$\Delta T = T - T_0$ — приращение температуры, °C,
 T — текущая температура, °C,
 T_0 — начальная температура, °C,
 ΔT_{∞} — приращение температуры при $t \rightarrow \infty$, °C,
 t — время,
 a_i, b_i — коэффициенты.

Если воспользоваться первыми двумя членами, то при начальных условиях $\Delta T(t=0) = 0$ приходим к известному выражению

$$\Delta T(t) = K_0 [1 - \exp(-K_1 t)]. (5)$$

где $K_0 = \Delta T_{\infty}$, K_1 — эмпирические коэффициенты.

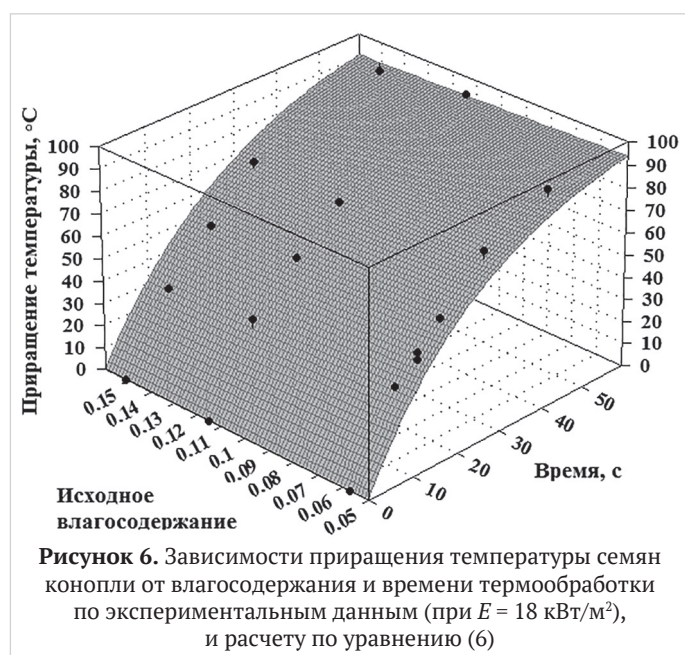
Поскольку по предварительным оценкам исходная влажность существенно сказывается на коэффициенте K_1 предлагается использовать модифицированный вариант модели (5) в виде формулы:

$$\Delta T(t) = K_0 [1 - \exp(-K_1 W_0^K t)]. (6)$$

где W_0 — исходная влажность,

K_1 и K — эмпирические коэффициенты.

В результате идентификации коэффициентов модели (6) по данным для $E = 18 \text{ кВт/м}^2$ получены следующие данные: $K_0 = 102,1$, $K_1 = 0,0297$, $K = -0,116$, квадрат коэффициента множественной корреляции $R^2 = 0,99$, остаточное среднеквадратичное отклонение $F = 2,4$. График зависимости приращения температуры семян конопли от влагосодержания и времени термообработки по экспериментальным данным и расчету по (6) представлен на Рисунке 6.



Кроме исходной влажности, на значение коэффициентов влияют температура в зоне обработки T_c и облученность E .

Модель влагопотерь

Зависимость, описывающая изменение влажности в процессе нагрева с учетом высокой температуры в зоне обработки ($W = 0$ при $t \rightarrow \infty$) также может быть представлена в виде экспоненциального ряда вида [15]:

$$\Delta W / W_0 = a_0 + a_1 \exp(-b_1 t) + a_2 \exp(-b_2 t) + \dots (7)$$

где:

$\Delta W = W_0 - W$ — потеря влаги,
 W — текущая влажность,
 W_0 — исходная влажность,
 t — время,
 a_i, b_i — коэффициенты.

При начальных условиях $W(t=0) = W_0$, воспользовавшись первыми двумя членами ряда (7), зависимость относительного влагосодержания от времени нагрева можно представить в виде:

$$W = W_0 \exp(-At), (8)$$

где A — эмпирический коэффициент.

Анализ экспериментальных данных показал зависимость коэффициентов модели (8) от исходного влагосодержания. Сказывается и влияние температуры в зоне обработки. Поэтому для фиксированных условий термообработки (постоянные облученность E и температура в зоне обработки T_c), которые чаще всего применяются в работе на установках ВТМ, модель предлагается модифицировать при помощи формулы:

$$W = W_0 \exp(-A W_0^B t), (9)$$

где A, B — эмпирические коэффициенты.

Для условий нагрева при температуре $T_c = 225-235 \text{ °C}$ и для облученности $E = 18 \text{ кВт/м}^2$ после идентификации коэффициентов модели (9) были получены следующие данные: $A = 0,0289$, $B = 0,138$, квадрат множественной корреляции $R^2 = 0,95$, остаточное среднеквадратичное отклонение $F = 0,056$. Эмпирические и расчетные данные представлены на графике Рисунке 7.



Время и температура в первом приближении связаны функциональной зависимостью (5). Подставим (5) в (8) и после преобразований, модель для относительного влагосодержания можно представить в виде функции от приращения температуры

$$W = W_0 (1 - a \Delta T)^b, \quad (10)$$

где:

ΔT — приращение температуры,
 W_0 — исходная влажность,
 W — текущая влажность,
 a и b — эмпирические коэффициенты.

Апробация модели (10) при различной исходной влажности семян конопли и ряда других видов зерна показала, что значение коэффициента « b » нелинейно зависит от исходной влажности [8]. Поэтому, предлагается модифицированная модель в виде

$$W = W_0 (1 - a \Delta T)^{bW_0^c} \quad (11)$$

где a , b , c — эмпирические коэффициенты.

В результате идентификации коэффициентов модели (11) по всем экспериментальным данным ($E = 12-18$ кВт/м²) были получены следующие их значения: $a=0,010$, $b=1,506$, $c=0,498$ при коэффициенте корреляции $R=0,98$ и остаточном среднеквадратичном отклонении $F=0,033$.

Относительное изменение влагосодержания при ИК нагреве по данным модели (11) и результатам экспериментов представлены на Рисунке 8.

При постоянных условиях ИК нагрева семян конопли (облученность и температура в зоне обработки) предложенные модели довольно хорошо описывают экспериментальные данные. Однако, на зависимость влажности $W(t)$ и приращения температуры $\Delta T(t)$ от времени оказывают существенное влияние условия нагрева. В то же время исходя из результатов обработки и имеющихся экспериментальных данных следует, что характер зависимости $W(\Delta T)$ определяется исходной влажностью и является инвариантным к условиям нагрева, т. е. слабо от них зависящим.

4. Выводы

Предлагаемые динамические стационарные модели нагрева и обезвоживания позволяют прогнозировать резуль-

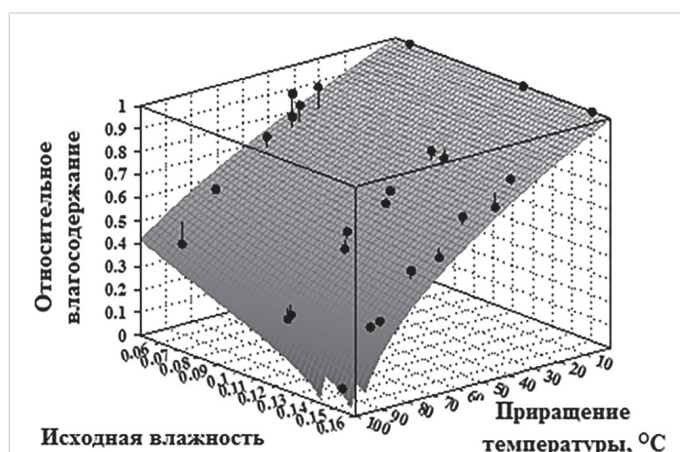


Рисунок 8. Зависимость относительного влагосодержания от приращения температуры семян и исходной влажности

таты ИК термообработки семян конопли в зависимости от исходной влажности и времени нагрева при постоянстве остальных режимов. При изменении режимов нагрева коэффициенты существенно меняются. Как правило, ВТМ установки не предполагают оперативного изменения параметров излучения и температуры среды (режимов) в рабочей зоне. В то же время, влажность сырья может существенно меняться.

Однако следует учитывать, что данные модели удовлетворительно описывают процесс обезвоживания в пределах ограниченных верхним значением температуры семян не многим более 100 °С.

Метод ВТМ позволяет за короткое время снизить влажность семян (в зависимости от режимов и исходной влажности) в 1,1–1,5 раз не превышая при этом температуру в 60 °С, что важно для сохранения биоактивных веществ. В случае необходимости более существенной дегидратации целесообразно использовать циклический нагрев.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Зверев, С.В. (2009). Высокотемпературная микронизация в производстве зернопродуктов. — М.: ДеЛи принт, 2009.
- Ilyasov, S. G., Krasnikov, V. V. (1991). Physical principles of infrared irradiation of food products. New York: Hemisphere Publishing House, 1991.
- Pan, Z., Atungulu, G.G. (2010). Infrared heating for food and agricultural processing. New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.
- Yadav, K., Gupta, N., Sood, M., Anjum, N., Ankita Chib, A. (2020). Infrared heating and its application in food processing. *Pharma Innovation Journal*, 9(2), 142–151.
- Brandão, R. J., Borel, L. D. M. S., Marques, L. G., Prado, M. M. (2016). Heat and mass transfer, energy and product quality aspects in drying processes using infrared radiation. *Advanced Structured Materials*, 63, 111–130. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19767-8_6
- Зверев, С.В., Ставцев, А.Э., Цыгутин, А.С. (2019). Белый люпин: обрушение и термообработка зерна. — М.: Сам Полиграфист, 2019.
- Rahmawati, L., Saputra, D., Sahim, K., Priyanto, G. (2018). Effect of infrared radiation on chemical and physical properties on duku's peel. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 12(1), 744–755. <https://doi.org/10.5219/985>
- Zverev, S., Sesikashvili, O. (2018). Heating and dehydration of grain and cereals at a combined energy supply. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 12(1), 79–90. <https://doi.org/10.5219/840>
- Зверев С. В., Зубцов В. А. (2018). Высокотемпературная микронизация семян льна. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология, 2–3(362–363), 78–81.
- Zverev, S., Sesikashvili, O. (2018). Modeling of urease thermal inactivation processes in soybean at high-temperature micronization. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 12(1), 512–519. <https://doi.org/10.5219/940>
- Мышкис, А.Д. (2007). Элементы теории математических моделей. — М.: КомКнига, 2007.
- Pujianto, A., Sidhi, S. D. P., Nurfaui, A. (2019). Mathematical modeling of thin layer drying of salted yellowtail fish under open sun and greenhouse drier. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 7(91), 391–400. <https://doi.org/10.18551/rjoas.2019-07.46>
- Ismail, N. F., Mat Nawi, H. N., Zainuddin, N. (2019). Mathematical modelling of drying kinetics of oven dried hibiscus sabdariffa seed. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1349(1), Article 012144. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1349/1/012144>
- de Almeida, F. N. C., Johann, G., Siqueira, N. W., Souza, G. K., Pereira, N. C. (2021). Convective drying of moringa oleifera seeds: Kinetics modelling and effects on oil yield from different extraction techniques. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01198-8> (unpublished data)
- Лыков, А.В., Михайлов Ю. А. (1963). Теория тепло- и массопереноса. — М.-Л.: Государственное энергетическое издательство. — 1963.
- Серков, В.А., Александрова, М.Р., Смирнов, А.Д. (2018). Развитие коноплеводства в России и мире. *Сурский вестник*. 3(3), 29–36.
- Динамика коноплеводства отдельных стран мира. Электронный ресурс: <http://tku.org.ua/ru/view-news>. Дата обращения 12.01.2021.
- ГОСТ 9158–76 «Семена конопли. Промышленное сырье. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2010. — 6 с.
- Зверев, С.В., Зубцов, В. А., Росляков, Ю.Ф., Ефремов, Д.П., Янова, М.А. (2020). Физико-технологические свойства семян конопли. *Вестник КрасГАУ*, 11(164), 240–247. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-11-240-247>
- Leonard, W., Zhang, P., Ying, D., Fang, Z. (2020). Hempseed in food industry: Nutritional value, health benefits, and industrial applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(1), 282–308. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12517>
- ГОСТ 10856–96 «Семена маслянистые. Методы определения влажности». М.: Стандартинформ, 2010. — 6 с.

REFERENCES

- Zverev, S. V. (2009). High-temperature micronization in the production of grain products. Moscow: DeLi Print, 2009. (In Russian)
- Ilyasov, S. G., Krasnikov, V. V. (1991). Physical principles of infrared irradiation of food products. New York: Hemisphere Publishing House, 1991.
- Pan, Z., Atungulu, G.G. (2010). Infrared heating for food and agricultural processing. New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.
- Yadav, K., Gupta, N., Sood, M., Anjum, N., Ankita Chib, A. (2020). Infrared heating and its application in food processing. *Pharma Innovation Journal*, 9(2), 142–151.
- Brandão, R. J., Borel, L. D. M. S., Marques, L. G., Prado, M. M. (2016). Heat and mass transfer, energy and product quality aspects in drying processes using infrared radiation. *Advanced Structured Materials*, 63, 111–130. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19767-8_6
- Zverev, S. V., Stavtsev, A.E., Tsygutkin, A.S. (2019). White lupin: collapse and heat treatment of grain. Moscow: Sam Polygraphist, 2019. (In Russian)
- Rahmavati L., Saputra D., Sahim K. Priyanto G. (2018). The effect of infrared radiation on the chemical and physical properties of the dooku peel. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 12(1), 744–755. <https://doi.org/10.5219/985>
- Zverev, S., Sesikashvili, O. (2018). Heating and dehydration of grain and cereals with combined energy supply. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 12(1), 79–90. <https://doi.org/10.5219/840>
- Zverev, S. V., Zubtsov, V. A. (2018). High-temperature micronization of flax seeds. *Izvestiya VUZov. Food technology*, 2–3(362–363), 78–81. (In Russian)
- Zverev, S., Sesikashvili, O. (2018). Modeling of urease thermal inactivation processes in soybean at high-temperature micronization. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 12(1), 512–519. <https://doi.org/10.5219/940>
- Myshkis, A.D. (2007). Elements of the theory of mathematical models. Moscow: ComBook, 2007. (In Russian)
- Pujianto, A., Sidhi, S. D. P., Nurfaizi, A. (2019). Mathematical modeling of thin layer drying of salted yellowtail fish under open sun and greenhouse drier. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 7(91), 391–400. <https://doi.org/10.18551/rjoas.2019-07.46>
- Ismail, N. F., Mat Nawi, H. N., Zainuddin, N. (2019). Mathematical modelling of drying kinetics of oven dried hibiscus sabdariffa seed. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1349(1), Article 012144. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1349/1/012144>
- de Almeida, F. N. C., Johann, G., Siqueira, N. W., Souza, G. K., Pereira, N. C. (2021). Convective drying of moringa oleifera seeds: Kinetics modeling and effects on oil yield from different extraction techniques. *Biomass Conversion and Biorefinery*, <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01198-8> (npublished data)
- Lykov, A. V. Mikhailov, Yu. A. (1963). The theory of heat and mass transfer. Moscow-Leningrad: State Energy Publishing House, 1963. (In Russian)
- Serkov, A.V., Alexandrova, M. R., Smirnov, A.D. (2018). The development of hemp in Russia and the world. *Sursky vestnik*, 3(3), 29–36. (In Russian)
- Dynamics of hemp production in individual countries of the world. Retrieved from <http://tku.org.ua/ru/view-news> Accessed January 12, 2021. (In Russian)
- GOST 9158–76 “Hemp seed. Industrial raw material. Specifications”. Moscow: Standartinform, 2010. — 6 p. (In Russian)
- Zverev, S. V., Zubtsov, V. A., Roslyakov, Yu. F., Efremov, D. P., Yanova, M.A. (2020). Physical and technological properties of hemp seeds. *Bulletin of KSAU*, 11, 240–247. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-11-240-247> (In Russian)
- Leonard, W., Zhang, P., Ying, D., Fang, Z. (2020). Hempseed in food industry: Nutritional value, health benefits, and industrial applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(1), 282–308. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12517>
- GOST 10856–96 “Oil seeds. Method for determination of moisture content”. Moscow: Standartinform, 2010. — 6 p. (In Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Зверев Сергей Васильевич — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Технология и техника производства зерновых культур», Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки 127434, Москва, Дмитровское шоссе, 11 Тел.: +7-903-533-38-43 E-mail: zverevsv@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6136-1796	Sergey V. Zverev — doctor of technical sciences, professor, head of laboratory “Technology and technique of cereal production”, All-Russian Scientific Research Institute of Grain and Products of Its Processing 11, Dmitrovskoe shosse, 127434, Moscow, Russia Tel.: +7-903-533-38-43 E-mail: zverevsv@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6136-1796
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	The authors declare no conflict of interest