

ISSN 1562-0417

КОРМОПРОИЗВОДСТВО

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

7 2021



УДК 631.363

ТЕРМОВЛАГООБМЕН ЗЕРНА ЛЮПИНА ПРИ НАГРЕВЕ В ПОТОКЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ЗВЕРЕВ С. В., доктор технических наук*ВНИИ зерна и продуктов его переработки — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН
117624, Россия, г. Москва, Дмитровское ш., д. 11*

E-mail: zverevsv@yandex.ru

КОСОЛАПОВ В. М., доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН*ФГБНУ «ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии им. В. Р. Вильямса»
141055, Россия, Московская обл., г. Лобня, Научный городок, корп. 1***СТАВЦЕВ А. Э., ООО «НПО «Агро-Матик»***607061, Россия, Нижегородская обл., г. Выкса, Досчатинское ш., д. 30/2***ТЮТЮНОВ С. И., доктор сельскохозяйственных наук***ФГБНУ «Белгородский ФАНЦ РАН»**308001, Россия, г. Белгород, ул. Октябрьская, д. 58***ЦЫГУТКИН А. С., кандидат биологических наук***ФГБНУ «Белгородский ФАНЦ РАН»**308001, Россия, г. Белгород, ул. Октябрьская, д. 58*

E-mail: asz.ru@mail.ru

Операция термообработки зерна с использованием радиационного (инфракрасного) энергоподвода, известная в России как высокотемпературная микронизация (ВТМ), чаще всего применяется на малых предприятиях по производству кормов, круп быстрого приготовления и зерновых хлопьев. Целью работы являлось изучение процесса нагрева и влагопотери зерна белого люпина в потоке ИК-излучения, а также разработка математических моделей изменения влажности зерна в зависимости от времени (экспозиции) нагрева, исходной влажности, температуры в рабочей зоне установки ИК-нагрева, при оценке поверхностной температуры радиационным методом. Объектом исследований было зерно белого люпина сорта Дега урожая 2019 года. Рассмотрение данной проблемы на примере белого люпина важно не только из-за её актуальности в кормопроизводстве, но и потому что люпин является перспективным источником растительного белка для пищевой промышленности. Факторами, оказывающими влияние на температуру зерна и его влажность, являются время обработки, температура среды в зоне обработки и исходная влажность зерна. Высота излучателя над поддоном определяет облучённость монослоя зерна и температуру среды в зоне обработки и является обобщающим фактором. Предлагаемые модели позволяют прогнозировать результаты ИК-термообработки семян белого люпина в зависимости от исходной влажности и времени нагрева при постоянстве остальных режимов. Обычно ВТМ установки не предполагают оперативного изменения параметров излучения и температуры среды 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 немногим более 100°C.

Ключевые слова: высокотемпературная микронизация, ИК-излучение, люпин белый, влажность зерна, влагопотеря.

Операция термообработки зерна с использованием радиационного (инфракрасного) энергоподвода, известная в России как высокотемпературная микронизация (ВТМ), чаще всего применяется на малых предприятиях по производству кормов, круп быстрого приготовления и зерновых хлопьев (Зверев, 2009; Zhongli, Griffiths, 2019).

В процессе нагрева повышается температура продукта, в результате чего происходит потеря влаги. Температура и конечная влажность зерна в процессе нагрева инфракрасным (ИК) излучением определяются рядом факторов: временем нагрева, исходной влажностью зерна и режимами термообработки (облучённостью, температурой среды в рабочей зоне).

Процесс нагрева, как правило, проводится при высоком тепловом напоре и ограничен временем начала потемнения поверхности зерна. Процесс влагопотери (сушка) мелких семян ряда крупяных и масличных культур при инфракрасном (ИК) нагреве рассматривался в работах (Зверев и др., 2017; 2019; Zverev, Sesikashvili, 2018; Афанасьев и др., 2014; Зверев, Зубцов, 2018; Жаркова и др., 2018; Белопухов и др., 2013). Температура продукта меняется непрерывно в течение всего периода обработки, т.е. процесс имеет существенно неизо-термический характер.

Рассмотрение данной проблемы на примере белого люпина важно не только из-за её актуальности в кормопроизводстве (Егоров и др., 2010; Зверев и др., 2014; 2015; Егоров и др.,

2017; Фисинин, 2019; Андрианова и др., 2019; Люпин: селекция, возделывание, использование, 2020), но и потому что люпин является перспективным источником растительного белка для пищевой промышленности (Гатаулина, Цыгуткин, 2014; Патент № 2724539; Патент № 2726205; Зверев и др., 2020; 2021).

Технологии возделывания и уборки белого люпина, первичной и глубокой его переработки известны и широко применяются (Чандраабал Зулцэцэг и др., 2015; Андрианова и др., 2015; Серегина и др., 2018; Алдошин и др., 2015а; 2015б; Алдошин и др., 2016; Перов и др., 2014; Зверев, Цыгуткин, 2014а; 2014б; Косолапов и др., 2020).

Целью работы являлось изучение процесса нагрева и влагопотери зерна белого люпина в потоке ИК-излучения, а также разработка математических моделей изменения влажности зерна в зависимости от времени (экспозиции) нагрева, исходной влажности, температуры в рабочей зоне установки ИК-нагрева, при оценке поверхностной температуры радиационным методом.

Методика исследований. Объектом исследований было зерно белого люпина сорта Дега урожая 2019 года. Общий вид зёрен дан на рис. 1.

Размеры семени белого люпина составляют: длина — 15,4 мм, ширина — 8,5 мм, толщина — 7,0 мм. Геометрические характеристики зерна приведены в табл. 1.

В процессе экспериментов для термообработки (ТО) зерна в качестве источника инфракрасного (ИК) излучения использовалась панель галогеновых кварцевых излучателей модели QP1 (с NiCr–NiAl термодарой типа «К») фирмы Elcer.

Измерение поверхностной температуры навески зерна проводилось следующим образом. Зерно люпина располагалось монослоем на поддоне, который на фиксированное время помещался в разогретую зону ИК-обработки. Далее поддон быстро вынимали и определяли температуру зерна с помощью инфракрасного лазерного термометра AR360A+ (IntellSafe, China), интервал измерения температуры — –50...360°C, точность — 0,5°C. Ошибка при оценке температуры за счёт теплопотери при перемещении зерна из зоны обработки в зону измерения незначительна.



Рис. 1. Общий вид зерна белого люпина сорта Дега

1. Средние геометрические характеристики зерна

Вид зерна	Геометрические параметры, мм		
	длина	ширина	толщина
Люпин белый Дега	18,7 (5,4*)	13,2 (1,2*)	6,6 (0,76*)

Примечание: * — дисперсия.

Исходная влажность зерна определялась на электронном цифровом измерителе влажности зерна и семян (влагомере) ВСП-100 (Харьков, Украина). Потеря массы (влаги) в процессе ИК-нагрева оценивалась как разность между исходной массой навески и её массой после ТО. Массу навески зерна до и после термообработки определяли на электронных цифровых аналитических весах модели SF-400C с точностью взвешивания 0,01 г. Влажность после термообработки рассчитывалась, исходя из исходной влажности и потери массы по формуле (%):

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

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

Независимыми переменными были исходная влажность W_0 , экспозиция (время термообработки) t и высота излучателя над монослоем зерна H . Исходная влажность W_0 варьировалась в диапазоне 10–35% и не имела строго фиксированных уровней. Экспозиция изменялась до верхнего уровня 120 с при шаге 30 с. Высота имела три уровня: 50–75–100 мм. В качестве обобщённой переменной использовалась температура зерна T после термообработки.

Результаты исследований. В общем случае факторами, оказывающими влияние на температуру зерна и его влажность, являются время обработки, температура среды в зоне обработки и исходная влажность зерна. Высота излучателя над поддоном определяет облучённость монослоя зерна и температуру среды в зоне обработки и является как бы обобщающим фактором.

Влияние высоты излучателя и исходной влажности на приращение температуры зерна в процессе нагрева представлено в виде формулы:

$$\Delta T = A H^B W_0^C, \quad (1)$$

где ΔT — приращение температуры зерна в процессе нагрева, °C; W_0 — исходная влажность, %; H — высота излучателя, мм; A , B , C — эмпирические коэффициенты; R — коэффициент корреляции.

Формула 1 для белого люпина при экспозиции 90 с приобретает следующий вид при использовании эмпирических коэффициентов, которые получены при их идентификации по результатам эксперимента:

$$\Delta T = 9255 H^{-0,880} W_0^{-0,222}, \quad (2)$$

В табл. 2 даны эмпирические коэффициенты, полученные при их идентификации по результатам экспериментальных данных для различных видов зерна.

На рис. 2 дан график зависимости приращения температуры зерна белого люпина от исходной влажности и высоты излучателя при экспозиции 90 с.

Из табл. 2 и графика (рис. 2) видно, что влияние обоих факторов значимо, и в общем случае модель нагрева должна учитывать их все. Однако, как правило, в промышленных установках высокотемпературной микронизации (ВТМ) облучённость и температура среды, характеризующие энергетическую активность среды, обусловлены конструктивным оформлением зоны обработки и постоянны. Варьируются время обработки и влажность продукта. Поэтому будем рассматривать эмпирические зависимости приращения температуры от времени и исходной влажности при постоянных высотах излучателя над монослоем продукта, используя двухфакторную модель.

2. Результаты идентификации коэффициентов модели (1) при экспозиции 90 с

Зерно	A	B	C	Квадрат коэффициента парной корреляции (R ²)
Люпин белый Дега	9255	-0,880	-0,222	0,95

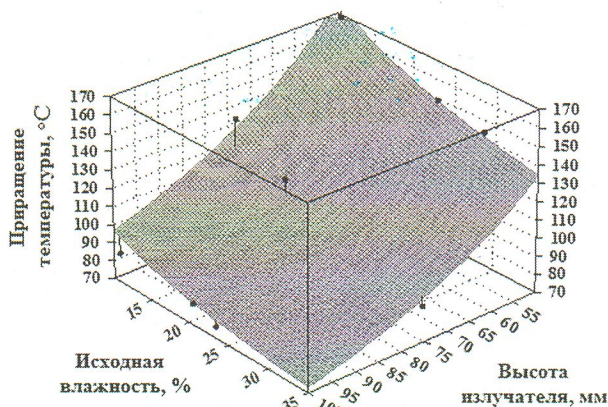


Рис. 2. Зависимость приращения температуры зерна белого люпина от исходной влажности и высоты излучателя при экспозиции 90 с

3. Результаты идентификации коэффициентов модели (5) при различном расстоянии излучателя от семян белого люпина

Высота излучателя над продуктом Н, мм	k ₀	k _t	C	Коэффициент корреляции, R
100	97,9	0,0588	-0,344	0,96
75	147,6	0,0890	-0,570	0,98
50	173,5	0,0717	-0,344	0,95

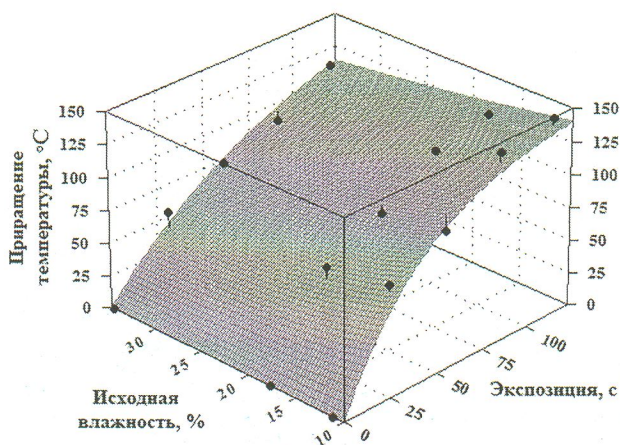


Рис. 3. Аппроксимирующая поверхность зависимости по модели (5) приращения температуры зерна белого люпина от исходной влажности и экспозиции при высоте излучателя над продуктом 75 мм

4. Результаты идентификации коэффициентов модели (5) при C = 1

Высота излучателя над продуктом Н, мм	k ₀	k _t	C	Коэффициент корреляции, R
100	106,2	0,344	-0,980	0,92
75	135,5	0,076	-0,526	0,96
50	162,2	0,122	-0,589	0,92

Решение системы дифференциальных уравнений теплопроводности для приращения температуры при ИК-нагреве было получено А.В. Лыковым в виде экспоненциальных рядов (Лыков, Михайлов, 1963):

$$\Delta T / (T_{\infty} - T_0) = 1 + a_1 \exp(-k_1 t) + \dots + a_i \exp(-k_i t), \quad (3)$$

где a и k — коэффициенты.

Взяв два первых члена, с учётом начальных условий $\Delta T(t=0) = 0$, приходим к тривиальному решению:

$$\Delta T = k_0 [1 - \exp(-k_1 t)]. \quad (4)$$

Поскольку $k_0 = T_{\infty} - T_0$ при $t \rightarrow \infty$ обусловлено только температурой и облученностью в зоне обработки, постольку влияние исходной влажности отнесем за счёт k_t :

$$\Delta T(t) = k_0 [1 - \exp(-k_t W_0 C_t)], \quad (5)$$

где k_0 , k_t и C — эмпирические коэффициенты.

Результаты идентификации коэффициентов модели (5) представлены в табл. 3.

На рис. 3 представлены экспериментальные данные и аппроксимирующая поверхность зависимости по трёхпараметрической модели (5) приращения температуры зерна люпина от исходной влажности и экспозиции, при высоте излучателя над продуктом 75 мм.

Упростим модель, сведя её к двухпараметрической. Учтём влияние исходной влажности в линейной форме. Результаты идентификации коэффициентов модели (5) при $C = 1$ представлены в табл. 4.

Упрощение модели снижает её прогностические показатели, хотя коэффициент корреляции остаётся выше 0,90. Во всех случаях прослеживается рост коэффициента k_0 с возрастанием высоты установки излучателя над продуктом, что может быть учтено в трёхфакторной модели.

Изменение влажности зерна в процессе

ИК-термообработки

Высота излучателей над поддоном определяет облучённость монослоя зерна и температуру среды в этой зоне. На рис. 4 даны экспериментальные данные зависимости влажности от её исходного значения и высоты излучателя при фиксированной экспозиции 90 с.

Если аппроксимировать полученные результаты в виде степенной зависимости, то для экспозиции 90 с получим:

$$W = 0,43 N^{0,069} W_0^{1,11}, \quad R = 0,98 \quad (6)$$

где W — конечная влажность зерна белого люпина, %.

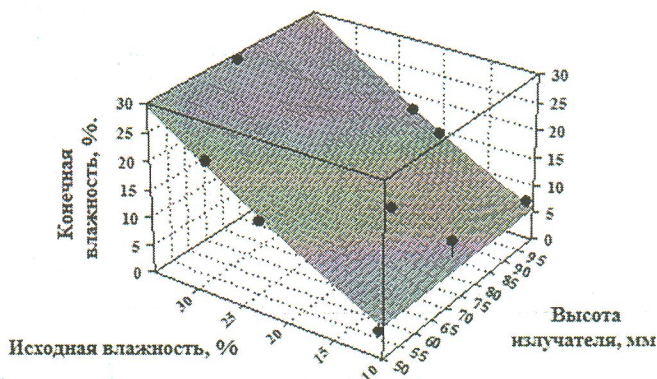


Рис. 4. Зависимость конечной влажности зерна белого люпина от её исходного значения и высоты при экспозиции 90 с

Из полученных выражений видно, что влияние расстояния от излучателя до монослоя зерна H на конечную влажность W очень слабое, а зависимость от исходной влажности W_0 близка к линейной.

На рис. 5 представлены эмпирические зависимости конечной влажности от её исходного значения при различной экспозиции: высота излучателя в диапазоне 50–100 мм. Видно, что для всех уровней экспозиции зависимость конечной влажности от исходной влажности близка к линейной, и с ростом экспозиции значения конечной влажности снижаются.

Аналогично приращению температуры, убыль влаги также может быть представлена в виде экспоненциального ряда (Зверев и др., 2019). Если воспользоваться двумя первыми членами ряда и учесть граничные условия $W(t=0) = W_0$, то модель можно представить в виде:

$$W = W_0 \text{Exp}(-A t). \quad (7)$$

В табл. 5 приведены результаты идентификации коэффициентов модели (7) по экспериментальным данным для отдельных культур при различной высоте излучателя над монослоем зерна.

Экспериментальные и расчётные данные по модели (7) представлены на рис. 6.

Время и температура связаны функциональной зависимостью. Выразив время через температуру и подставив в (7), после преобразования придём к выражению:

$$W = W_0 (1 - \Delta T / A)^B, \quad (8)$$

где W_0 — исходное влагосодержание; ΔT — приращение температуры; A, B — эмпирические константы.

В табл. 6 приведены результаты идентификации коэффициентов модели (8) по экспериментальным данным для отдельных культур при различной высоте установки излучателя H .

Значение коэффициентов модели существенно зависит от начального приближения, что говорит о множестве локальных минимумов целевой функции оптимизации коэффициентов модели (сумма квадратов невязки). В качестве начальных приближений были приняты $A = 250$ и $B = 1$.

Из табл. 6 видно, что для рассматриваемых зернопродуктов имеет место слабое различие в коэффициентах модели, поэтому можно рассматривать однопараметрическую модель, приняв $B = 1$.

Заключение. Предлагаемые модели позволяют прогнозировать результаты ИК-термообработки семян белого люпина и фасоли в зависимости от исходной влажности и времени нагрева при постоянстве остальных режимов. Обычно ВТМ установки не предполагают оперативного изменения параметров излучения и температуры среды 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°C.

Литература

1. Обоснование технологических параметров комбайнов на уборке белого люпина / Н.В. Алдошин, А.А. Золотов, А.С. Цыгуткин, В.Д. Сулеев, А.Е. Кузнецов, Н.А. Аладьев, Мала Бахаа // Достижения науки и техники АПК. — 2015. — № 1. — С.64–66.
2. Оценка повреждений зерна белого люпина при уборке урожая / Н.В. Алдошин, А.А. Золотов, А.С. Цыгуткин, Н.А. Аладьев, Мала Бахаа, В.Д. Сулеев, А.Е. Кузнецов // Тракторы и сельхозмашины. — 2015. — № 2. — С.26–29.

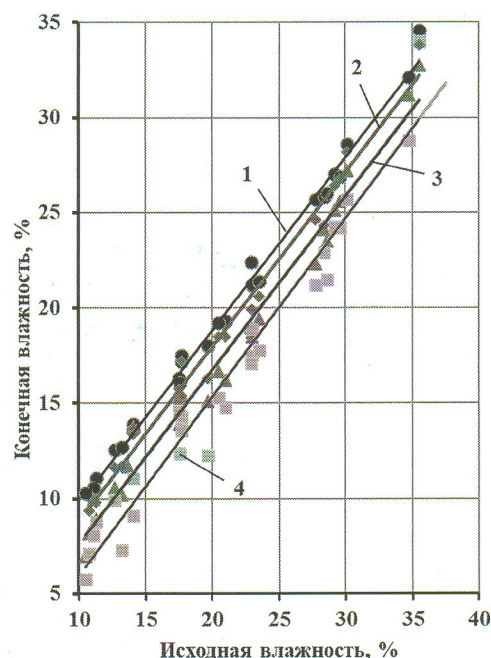


Рис. 5. Зависимость конечной влажности зерна белого люпина от её исходного значения при экспозиции: 1 — 30 с; 2 — 60 с; 3 — 90 с; 4 — 120 с

5. Параметры модели (7) при различной высоте излучателя и видам зерна

H , мм	A	Остаточное средне-квадратичное отклонение	Коэффициент корреляции, R
50	0,00245	0,92	0,98
75	0,00185	1,24	0,98
100	0,00236	0,41	0,99

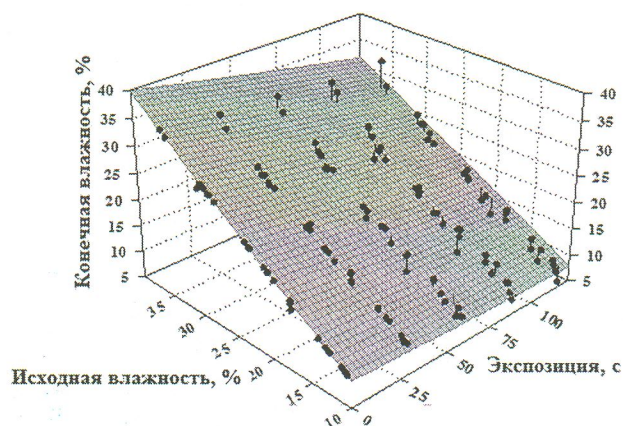


Рис. 6. Зависимость конечной влажности зерна белого люпина от её исходного значения и времени экспозиции при варьировании высоты излучателя в диапазоне 50–100 мм

6. Параметры модели (8) для различной высоты установки излучателя

H , мм	A	B	Остаточное средне-квадратичное отклонение	Коэффициент корреляции, R
50	672	1,02	1,33	0,97
75	591	1,00	1,12	0,99
100	402	1,02	0,81	0,98

3. Уборка бинарных посевов зерновых культур / Н.В. Алдошин, А.А. Золотов, А.С. Цыгуткин, Н.А. Лылин // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». — 2016. — № 3. — С.11–17.
4. Природный источник марганца — белый люпин / Е.Н. Андрианова, Л.В. Кривопишина, О.А. Чванова, А.С. Цыгуткин // Птица и птицепродукты. — 2015. — № 5. — С.47–49.
5. Люпин в кормлении сельскохозяйственной птицы / Е.Н. Андрианова, И.А. Егоров, Е.Н. Григорьева, А.С. Цыгуткин // Птицеводство. — 2019. — № 11–12. — С.31–36.
6. Афанасьев В.А. Математическое моделирование процесса микронизации зерна / В.А. Афанасьев, Е.Ю. Желтоухова, Д.С. Кочанов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. — 2014. — № 3. — С.6–10.
7. Белоухов С.Л. Применение термоанализа для изучения зерна белого люпина / С.Л. Белоухов, А.С. Цыгуткин, А.Л. Штеле // Достижения науки и техники АПК. — 2013. — № 4. — С.56–58.
8. Гатаулина Г.Г. Основа белковой независимости России / Г.Г. Гатаулина, А.С. Цыгуткин // Белый люпин. — 2014. — № 2. — С.2–6.
9. Белый люпин и другие зернобобовые культуры в кормлении птицы / И.А. Егоров, Е.Н. Андрианова, А.С. Цыгуткин, А.Л. Штеле // Достижения науки и техники АПК. — 2010. — № 9. — С.36–38.
10. Использование белкового концентрата на основе белого люпина в рационах цыплят-бройлеров / И.А. Егоров, Т.В. Егорова, А.Э. Ставцев, А.С. Цыгуткин // Птица и птицепродукты. — 2017. — № 1. — С.33–36.
11. Жаркова И.М. Исследование влияния параметров обработки зерна амаранта перед помолом на свойства полученной муки / И.М. Жаркова, Ю.А. Сафонова, А.А. Самохвалов // Вестник ВГУИТ. — 2018. — Т. 80. — № 4. — С.41–48.
12. Зверев С.В. Высокотемпературная микронизация в производстве зернопродуктов / С.В. Зверев. — М.: ДеЛи принт, 2009. — 222 с.
13. Зверев С.В. Подготовка зерна белого люпина к глубокой переработке / С.В. Зверев, А.С. Цыгуткин // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. — 2014. — № 2. — С.115–121.
14. Использование белого люпина в экономике России / С.В. Зверев, И.А. Панкратьева, А.С. Цыгуткин, А.Л. Штеле // Хранение и переработка зерна. — 2014. — № 5. — С.31–34.
15. Зверев С.В. Первичная переработка зерна белого люпина / С.В. Зверев, А.С. Цыгуткин // Современный фермер. — 2014. — № 6–7. — С.28–30.
16. Зверев С.В. Проблемы развития импортозамещения в сельском хозяйстве России / С.В. Зверев, А.С. Цыгуткин, Л.В. Постникова // Бухучёт в сельском хозяйстве. — 2015. — № 9. — С.7–12.
17. Зверев С.В. Соя. Переработка и применение / С.В. Зверев, О.Ш. Сесикашвили, Ю.Г. Булах. — Тбилиси: Lambert Academic Publishing, 2017. — 153 с.
18. Зверев С.В. Высокотемпературная микронизация семян льна / С.В. Зверев, В.А. Зубцов // Известия ВУЗов. Пищевая технология. — 2018. — № 2–3. — С.78–81.
19. Зверев С.В. Белый люпин: обрушение и термообработка зерна / С.В. Зверев, А.Э. Ставцев, А.С. Цыгуткин. — М.: Сам Полиграфист, 2019. — 128 с.
20. Использование метода спектрофотометрии для идентификации высокоалкалоидных семян белого люпина / С.В. Зверев, В.М. Косолапов, В.Б. Зайцев, А.Э. Ставцев, А.С. Цыгуткин // Кормопроизводство. — 2020. — № 10. — С.25–28.
21. Оптимизация режимных параметров молотковой дробилки при производстве кормов из зерна люпина белого сорта Дега / С.В. Зверев, В.М. Косолапов, С.И. Тютюнов, А.Э. Ставцев // Кормопроизводство. — 2021. — № 2. — С.36–41.
22. Обрушение белого люпина с использованием различных схем технологических операций / В.М. Косолапов, С.И. Тютюнов, А.Э. Ставцев, С.В. Зверев // Кормопроизводство. — 2020. — № 6. — С.30–35.
23. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. — М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1963. — 536 с.
24. Люпин: селекция, возделывание, использование. — Брянск: Брянское областное полиграфическое объединение, 2020. — 304 с.
25. Перов А.А. Белый люпин: дробление, шелушение и сепарация / А.А. Перов, С.В. Зверев, А.С. Цыгуткин // Комбикорма. — 2014. — № 6. — С.41–46.
26. Формирование урожайности зерна и показатели качества люпина белого (*Lupinus albus* L.) при применении селена натрия / И.И. Серегина, А.О. Шумилин, Ю.М. Вигилянский, С.Л. Белоухов, Е.А. Гришина, А.С. Цыгуткин, И.И. Дмитревская, В.А. Литвинский // Агрохимия. — 2018. — № 7. — С.73–80.
27. Фисинин В.И. Мировое и российское птицеводство: реалии и вызовы будущего / В.И. Фисинин. — М.: Хлебпродинформ, 2019. — 470 с.
28. Влияние новых изолятов клубеньковых бактерий на рост и развитие белого люпина сорта Детер 1 / Чандраабал Зулцэцэг, О.В. Селицкая, А.С. Цыгуткин, Г.В. Сепанова // Достижения науки и техники АПК. — 2015. — № 11. — С.78–80.
29. Способ производства крупяных продуктов из люпина. Зверев С.В., Ставцев А.Э., Цыгуткин А.С. Патент на изобретение № 2724539 C1, 23.06.2020. Заявка № 2019101345 от 17.01.2019.
30. Способ получения белкового кормового продукта из белого люпина. Зверев С.В., Ставцев А.Э., Цыгуткин А.С., Штеле А.Л. Патент на изобретение № 2726205 C1, 09.07.2020. Заявка № 2019144379 от 27.12.2019.
31. Zhongli Pan. Heating for Food and Agricultural Processing / Zhongli Pan, Griffiths Gregory Atungulu. — CRC Press LLC, 2019. — 300 p.
32. Zverev S. Heating and dehydration of grain and cereals at a combined energy supply / S. Zverev, O. Sesikashvili // Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. — 2018. — Vol. 12. — No. 1. — P.79–90.

References

1. Obosnovanie tekhnologicheskikh parametrov kombaynov na uborke belogo lyupina / N.V. Aldoshin, A.A. Zolotov, A.S. Tsygutkin, V.D. Suleev, A.E. Kuznetsov, N.A. Aladev, Mala Bakhaa // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. — 2015. — No. 1. — P.64–66.
2. Otsenka povrezhdeniy zerna belogo lyupina pri uborke urozhaya / N.V. Aldoshin, A.A. Zolotov, A.S. Tsygutkin, N.A. Aladev, Mala Bakhaa, V.D. Suleev, A.E. Kuznetsov // Traktory i selkhoz mashiny. — 2015. — No. 2. — P.26–29.
3. Uborka binarnykh posevov zernovykh kultur / N.V. Aldoshin, A.A. Zolotov, A.S. Tsygutkin, N.A. Lylin // Vestnik FGOU VPO "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V.P. Goryachkina". — 2016. — No. 3. — P.11–17.
4. Prirodnyy istochnik margantsa — belyy lyupin / E.N. Andrianova, L.V. Krivopishina, O.A. Chvanova, A.S. Tsygutkin // Ptitsa i ptitseprodukty. — 2015. — No. 5. — P.47–49.
5. Lyupin v kormlenii selskokhozyaystvennoy ptitsy / E.N. Andrianova, I.A. Egorov, E.N. Grigoreva, A.S. Tsygutkin // Ptitsevodstvo. — 2019. — No. 11–12. — P.31–36.
6. Afanasev V.A. Matematicheskoe modelirovanie protsessu mikronizatsii zerna / V.A. Afanasev, E.Yu. Zheltoukhova, D.S. Kochanov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy. — 2014. — No. 3. — P.6–10.
7. Belopukhov S.L. Primenenie termoanaliza dlya izucheniya zerna belogo lyupina / S.L. Belopukhov, A.S. Tsygutkin, A.L. Shtelet // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. — 2013. — No. 4. — P.56–58.
8. Gataulina G.G. Osnova belkovoy nezavisimosti Rossii / G.G. Gataulina, A.S. Tsygutkin // Belyy lyupin. — 2014. — No. 2. — P.2–6.
9. Belyy lyupin i drugie zernobobovye kultury v kormlenii ptitsy / I.A. Egorov, E.N. Andrianova, A.S. Tsygutkin, A.L. Shtelet // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. — 2010. — No. 9. — P.36–38.
10. Ispolzovanie belkovogo kontsentrata na osnove belogo lyupina v ratsionakh tsyplyat-broylerov / I.A. Egorov, T.V. Egorova, A.E. Stavtsev, A.S. Tsygutkin // Ptitsa i ptitseprodukty. — 2017. — No. 1. — P.33–36.
11. Zharkova I.M. Issledovanie vliyaniya parametrov obrabotki zerna amaranta pered pomolom na svoystva poluchennoy muki / I.M. Zharkova, Yu.A. Safonova, A.A. Samokhvalov // Vestnik VGUIT. — 2018. — Vol. 80. — No. 4. — P.41–48.

12. Zverev S.V. Vysokotemperaturnaya mikronizatsiya v proizvodstve zernoproduktov / S.V. Zverev. — Moscow: DeLi print, 2009. — 222 p.
13. Zverev S.V. Podgotovka zerna belogo lyupina k glubokoy pererabotke / S.V. Zverev, A.S. Tsygutkin // Innovatsionnye tekhnologii proizvodstva i khraneniya materialnykh tsennostey dlya gosudarstvennykh nuzhd. — 2014. — No. 2. — P.115–121.
14. Ispolzovanie belogo lyupina v ekonomike Rossii / S.V. Zverev, I.A. Pankrateva, A.S. Tsygutkin, A.L. Shtele // Khranenie i pererabotka zerna. — 2014. — No. 5. — P.31–34.
15. Zverev S.V. Pervichnaya pererabotka zerna belogo lyupina / S.V. Zverev, A.S. Tsygutkin // Sovremennyy fermer. — 2014. — No. 6–7. — P.28–30.
16. Zverev S.V. Problemy razvitiya importozameshcheniya v selskom khozyaystve Rossii / S.V. Zverev, A.S. Tsygutkin, L.V. Postnikova // Bukhuchet v selskom khozyaystve. — 2015. — No. 9. — P.7–12.
17. Zverev S.V. Soya. Pererabotka i primeneniye / S.V. Zverev, O.Sh. Sesikashvili, Yu.G. Bulakh. — Tbilisi: Lambert Academic Publishing, 2017. — 153 p.
18. Zverev S.V. Vysokotemperaturnaya mikronizatsiya semyan Ina / S.V. Zverev, V.A. Zubtsov // Izvestiya VUZov. Pishchevaya tekhnologiya. — 2018. — No. 2–3. — P.78–81.
19. Zverev S.V. Belyy lyupin: obrusheniye i termoobrabotka zerna / S.V. Zverev, A.E. Stavtsev, A.S. Tsygutkin. — Moscow: Sam Poligrafist, 2019. — 128 p.
20. Ispolzovanie metoda spektrofotometrii dlya identifikatsii vysokoalkaloidnykh semyan belogo lyupina / S.V. Zverev, V.M. Kosolapov, V.B. Zaytsev, A.E. Stavtsev, A.S. Tsygutkin // Kormoproizvodstvo. — 2020. — No. 10. — P.25–28.
21. Optimizatsiya rezhimnykh parametrov molotkovoy drobilki pri proizvodstve kormov iz zerna lyupina belogo sorta Dega / S.V. Zverev, V.M. Kosolapov, S.I. Tyutyunov, A.E. Stavtsev // Kormoproizvodstvo. — 2021. — No. 2. — P.36–41.
22. Obrusheniye belogo lyupina s ispolzovaniem razlichnykh skhem tekhnologicheskikh operatsiy / V.M. Kosolapov, S.I. Tyutyunov, A.E. Stavtsev, S.V. Zverev // Kormoproizvodstvo. — 2020. — No. 6. — P.30–35.
23. Lykov A.V. Teoriya teplo- i massoperenosa / A.V. Lykov, Yu.A. Mikhaylov. — Moscow–Leningrad: Gosudarstvennoye energeticheskoye izdatelstvo, 1963. — 536 p.
24. Lyupin: selektsiya, vozdeystviye, ispolzovanie. — Bryansk: Bryanskoye oblastnoye poligraficheskoye obiedineniye, 2020. — 304 p.
25. Perov A.A. Belyy lyupin: drobleniye, shelusheniye i separatsiya / A.A. Perov, S.V. Zverev, A.S. Tsygutkin // Kombikorma. — 2014. — No. 6. — P.41–46.
26. Formirovaniye urozhaynosti zerna i pokazateli kachestva lyupina belogo (*Lupinus albus* L.) pri primenenii selena natriya / I.I. Seregina, A.O. Shumilin, Yu.M. Vigilyanskiy, S.L. Belopukhov, E.A. Grishina, A.S. Tsygutkin, I.I. Dmitrevskaya, V.A. Litvinskiy // Agrokhiimiya. — 2018. — No. 7. — P.73–80.
27. Fisinin V.I. Mirovoye i rossiyskoye ptitsevodstvo: realii i vyzovy budushchego / V.I. Fisinin. — Moscow: Khlebprodinform, 2019. — 470 p.
28. Vliyaniye novykh izolyatov klubenkovykh bakteriy na rost i razvitiye belogo lyupina sorta Deter 1 / Chandraabal Zultsetseg, O.V. Selitskaya, A.S. Tsygutkin, G.V. Sepanova // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. — 2015. — No. 11. — P.78–80.
29. Sposob proizvodstva krupyanykh produktov iz lyupina. Zverev S.V., Stavtsev A.E., Tsygutkin A.S. Patent na izobretenie No. 2724539 C1, 23.06.2020. Zayavka No. 2019101345 ot 17.01.2019.
30. Sposob polucheniya belkovogo kormovogo produkta iz belogo lyupina. Zverev S.V., Stavtsev A.E., Tsygutkin A.S., Shtele A.L. Patent na izobretenie No. 2726205 C1, 09.07.2020. Zayavka No. 2019144379 ot 27.12.2019.
31. Zhongli Pan. Heating for Food and Agricultural Processing / Zhongli Pan, Griffiths Gregory Atungulu. — CRC Press LLC, 2019. — 300 p.
32. Zverev S. Heating and dehydration of grain and cereals at a combined energy supply / S. Zverev, O. Sesikashvili // Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. — 2018. — Vol. 12. — No. 1. — P.79–90.

WATER EXCHANGE IN LUPINE GRAIN UNDER INFRARED RADIATION

ZVEREV S. V., Dr. Techn. Sc.

The All-Russian Research Institute of Grain and Grain Products — branch of the Federal Research Center of Food Systems n. a. V. M. Gorbato of the Russian Academy of Science
117624, Russia, Moscow, Dmitrovskoye highway (shosse), 11

E-mail: zverevsv@yandex.ru

KOSOLAPOV V. M., Dr. Agr. Sc., member of the Russian Academy of Science

Federal Williams Research Center of Fodder Production and Agroecology
141055, Russia, the Moscow region, Lobnya, Science Town, 1

STAVTSEV A. E.

OOO Research and Production Association “Agro-Matik”, a limited liability company under the laws of Russian Federation
607061, Russia, the Nizhny Novgorod region, Vyksa, Doschatinskoye highway (shosse), 30/2

TYUTYUNOV S. I., Dr. Agr. Sc.

Belgorod Federal Agrarian Research Center of the Russian Academy of Science
308001, Russia, Belgorod, Oktyabrskaya str., 58

TSYGUTKIN A. S., PhD Biol. Sc.

Belgorod Federal Agrarian Research Center of the Russian Academy of Science
308001, Russia, Belgorod, Oktyabrskaya str., 58

E-mail: asz.ru@mail.ru

Grain heat treatment known as high-temperature micronization is often used at small-scale organizations producing forage, instant cereals and grain flakes. The goal of the investigation was to analyze heating and water loss of lupine grain under infrared rays as well as develop mathematical models of grain water content variation as affected by heating time, initial water content in grain, temperature in the working zone. The object of this study was white lupine “Dega” harvested in 2019. This investigation has a high value both for food and forage production since lupine is a good source of protein. The distance between a radiator and tray directly affects grain exposure rate and air temperature in the working zone. The models developed are able to prognose the possible outcomes when treating seeds of lupine. Initial water content in grain and exposure time has the most significant effect on the final result. Normally it is not possible to control radiation intensity and air temperature when using such an equipment. At the same time water content can vary significantly in raw materials used. Such models fit heating process most accurately under the temperature of slightly over 100°C.

Keywords: high-temperature micronization, infrared rays, white lupine, grain moisture content, water loss.