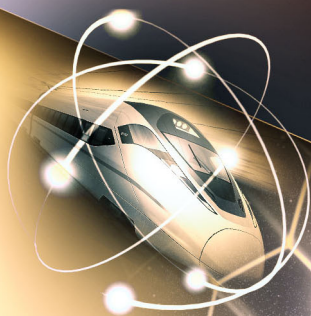




*RBE DER
EUROPÄISCHEN
WISSENSCHAFT*

*HERITAGE OF EUROPEAN
SCIENCE '2020*

*MONOGRAPH
PART I*





Fialko N., Zhuravskaya N., Kulikov P., Titlov A., Glamazdin P. et al.

ERBE DER EUROPÄISCHEN WISSENSCHAFT
UMWELTSCHUTZ
HERITAGE OF EUROPEAN SCIENCE
ENVIRONMENTAL PROTECTION

Monographic series «European Science»
Book 2. Part 1.

In internationalen wissenschaftlich-geometrischen Datenbanken enthalten
Included in International scientometric databases

MONOGRAPHIE
MONOGRAPH

Authors:

Aleshko S. (8, 12), Altman E. (1), Balina E. (2), Bezklubenko I. (2), Bilenko N. (15),
Bordiuh V. (13), Boshkov L. (1), Boshkova I. (1), Butsenko Y. (2), Chernykh L. (8),
Doroshenko V. (15), Dotsenko S. (4), Fialko N. (4, 8, 12), Galinska T. (5),
Georgiesh E. (15), Getun G. (2), Glamazdin D. (3), Glamazdin P. (3), Ilina T. (6),
Kachmar N. (9), Klyuyeva V. (4), Klymchuk M. (6), Kulikov P. (4, 8, 14), Kutnyak O. (12),
Kyslyuk D. (11), Maletskaya O. (12), Mazurak O. (9), Meranova N. (4, 8, 12),
Pereginets I. (10), Polozenko N. (4, 8, 12), Prokopov V. (8, 12), Rokitko K. (12),
Sahala T. (15), Savenko V. (4, 8, 11), Sherenkovsky J. (12), Titlov A. (1, 15),
Tsyfra T. (13), Vasylyv O. (15), Vershigora D. (13), Volgusheva N. (1), Vysotska L. (11),
Wildman I. (14), Zelisko O. (9), Zhuravska N. (14), Zhuravskiy O. (11), Zygun A. (5),
Krukouska T. (7)

Reviewers:

Ploskyy V.O. - Doctor of Technical Sciences.
Trokhymenko H.H. - Doctor of Technical Sciences.
Prokopov V.H. - Doctor of Technical Sciences.

Erbe der europäischen wissenschaft: Umweltschutz. Monografische Reihe
«Europäische Wissenschaft». Buch 2. Teil 1. 2020.

Heritage of european science: Environmental protection.
Monographic series «European Science». Book 2. Part 1. 2020.

ISBN 978-3-9821783-3-2
DOI: 10.21893/978-3-9821783-3-2.2020-02-01

Published by:

ScientificWorld-NetAkhatAV
Lußstr. 13
76227 Karlsruhe, Germany
in conjunction with Institute «SE&E»
e-mail: orgcom@sworld.education
site: www.sworld.education

Copyright © Authors, 2020
Copyright © Drawing up & Design. ScientificWorld-NetAkhatAV, 2020



Inhalt / Content

CHAPTER 1. INVESTIGATIONS OF INFLUENCE EFFECTS OF MICROWAVE FIELD ON PLANT TISSUE

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ПОЛЯ НА
РАСТИТЕЛЬНУЮ ТКАНЬ..... 9

CHAPTER 2. ASPECTS OF DESIGN OF ENCLOSURE STRUCTURES OF ENERGY EFFICIENT BUILDINGS IN UKRAINE

АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЗДАНИЙ В УКРАИНЕ..... 26

CHAPTER 3. MODERNIZATION OF WATER-HEATING WATER-TUBE BOILERS OF HEATING BOILER SYSTEMS DISTRICT HEATING TO IMPROVE THEIR ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВОДОГРЕЙНЫХ ВОДОТРУБНЫХ КОТЛОВ ОТОПИТЕЛЬНЫХ
КОТЕЛЕН СИСТЕМАМИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК..... 44

CHAPTER 4. ECO-ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY MANAGEMENT BASED ON THE USE OF INFORMATION TECHNOLOGY

ЭКОЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ НА ОСНОВЕ
ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 60

CHAPTER 5. ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE FORMATION OF SOLID WASTE MANAGEMENT

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ СФЕРЫ
ОБРАЩЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ БЫТОВЫМИ ОТХОДАМИ..... 90

CHAPTER 6. SCIENTIFIC-APPLIED PRINCIPLES OF RISK MANAGEMENT IN ENTERPRISES: POSTULATES, TRENDS, MODIFICATION

НАУЧНО-ПРИКЛАДНЫЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ НА
ПРЕДПРИЯТИЯХ: ПОСТУЛАТЫ, ТРЕНДЫ, МОДИФИКАЦИЯ 103

CHAPTER 7. NEW APPROACHES TO EVALUATING OF TOXIC AND CONDITIONALLY TOXIC CHEMICAL ELEMENTS EXPOSITION TO POPULATION IN MODERN CONDITIONS OF TECHNOGENICALLY CHANGED BIOGEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE HABITAT

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЭКСПОЗИЦИИ ТОКСИЧНЫХ И УСЛОВНО
ТОКСИЧНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА НАСЕЛЕНИЕ В СОВРЕМЕННЫХ
УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННО ИЗМЕНЕННЫХ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДЫ ОБИТАНИЯ 118



CHAPTER 8. ENERGY-SAVING TYPES OF HEATING FOR CREATING REGULATED AND COMFORTABLE HEAT REGIME OF RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ВИДЫ ОТОПЛЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОРМИРОВАННОГО И КОМФОРТНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ. 131

CHAPTER 9. TREATMENT OF MINING WATER FROM HEAVY METALS: CHEMICAL AND BIOLOGICAL TECHNOLOGIES

ОЧИЩЕНИЕ ШАХТНЫХ ВОД ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ: ХИМИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ 151

CHAPTER 10. THEORETICAL AND METHODOLOGICAL BASIS OF DESIGN OF ZERO ENERGY BUILDINGS (ZEB)

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ НУЛЕВОЙ ЭНЕРГИИ (ZEB) 163

CHAPTER 11. ECOLOGICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY OF PROTECTION AGAINST CORROSION OF METAL STRUCTURES, MACHINES AND PRODUCTS BY ENVIRONMENTALLY FRIENDLY PLANT-BASED MEDIA (CONTRRUST TYPE)

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ, МАШИН И ИЗДЕЛИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫМИ СРЕДСТВАМИ НА РАСТИТЕЛЬНОЙ ОСНОВЕ (ТИПА CONTRRUST)..... 170

CHAPTER 12. ENERGY-ECOLOGICALLY EFFICIENT MICROJET BURNER DEVICES OF STABILIZER TYPE

ЭНЕРГОЭКОЛОГОЭФФЕКТИВНЫЕ МИКРОФАКЕЛЬНЫЕ ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА СТАБИЛИЗАТОРНОГО ТИПА..... 189

CHAPTER 13. ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT IN THE IMPLEMENTATION OF THE PROJECT OF RECONSTRUCTION OF THE KYIV ZOO ZOLOGICAL PARK

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА РЕКОНСТРУКЦИИ КИЕВСКОГО ЗООЛОГИЧЕСКОГО ПАРКА..... 205

CHAPTER 14. NATURE PRINCIPLES WHEN USING REAGENT-FREE WATER TREATMENT

ПРИНЦИПЫ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БЕЗРЕАГЕНТНОЙ ПОДГОТОВКИ ВОДЫ..... 220



CHAPTER 15. ESTIMATION OF PROSPECTS FOR PRE-COOLING OF NATURAL GAS IN MAIN GAS PIPELINES BEFORE COMPRESSING WITH HEAT-USING ABSORPTION COOLING MACHINES

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В
МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ ПЕРЕД СЖАТИЕМ ПРИ ПОМОЩИ
ТЕПЛОИСПОЛЗУЮЩИХ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН 237

References 254



KAPITEL 1 / CHAPTER 1. INVESTIGATIONS OF INFLUENCE EFFECTS OF MICROWAVE FIELD ON PLANT TISSUE

**ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ПОЛЯ НА
РАСТИТЕЛЬНУЮ ТКАНЬ**

DOI: 10.30888/978-3-9821783-0-1.2020-01-01-064

Вступление.

Термообработка материалов растительного происхождения является определяющей для большинства технологических процессов, в частности, сушки, стерилизации и биостимуляции. Энергетический кризис и увеличение спроса на продукцию улучшенного качества вызвали необходимость совершенствования традиционных технологий и развития новых. В этом направлении методы с использованием энергии микроволнового электромагнитного поля (МВ ЭМП) давно зарекомендовали себя как высокоэффективные [1]. Применение микроволнового нагрева признано целесообразным для модернизации ряда технологических схем производств [2–5]. Однако неполнота знаний об эффектах воздействия микроволнового поля на растительные материалы не позволяет переходить на эффективные микроволновые технологии.

Исследование процессов взаимодействия микроволнового электромагнитного поля с материалами растительного происхождения, определение условий обработки, являются актуальными задачами для развития эффективных по производительности и энергетически рациональных технологий.

1. Современный уровень исследований влияния МВ поля на растительную ткань

Как было установлено [3, 4], эффективность применения каждого из рассматриваемых методов связана с изменением структуры растительного материала в ходе МВ обработки. Если в методе биостимуляции семян одной из задач являлось исключение режимов, нарушающих целостность клеточных стенок [6], то при подготовке субстрата на основе соломы разрушение растительной структуры является желательным. Исследования [7] показали, что поверхность исходного соломистого материала представляет собой гладкую и относительно однородную поверхность по высоте, в то время как поверхность обработанного образца отличается существенной шероховатостью. Полученные



результаты свидетельствуют о расширении капилляров вследствие микровзрывов. В настоящее время созданы основы для практического применения в сельском хозяйстве микроволновой предпосевной технологии обработки семян [2, 3].

Оценка влияния времени микроволновой экспозиции на стимуляцию всхожести [8] демонстрирует наличие оптимума, при 10 с обработки всхожесть достигла максимума. Однако не отмечаются удельные затраты энергии (на килограмм семян) с учетом коэффициента полезного действия камеры. Было однозначно определено, что влияние обработки в МВ поле проявляется существенней на семенах с изначально невысокой всхожестью, чем на семенах, лабораторная всхожесть которых составляла выше 95 %. Воздействие микроволн значительно увеличило энергии прорастания и прорастания у 8-летних семян моркови [9]. Максимальное прорастание семян моркови было установлено на частоте 9,3 ГГц при воздействии до 5 мин. Действие микроволнового электромагнитного поля на семена способно привести к существенному биостимулирующему эффекту, который проявляется на всех этапах вегетации растений [10, 11].

Проявление биостимуляции заключается в увеличении энергии всхожести, энергии прорастания, а при росте растений из обработанных семян – в усилении корневой системы, сокращении фаз вегетации. Этот эффект наблюдали как при обработке семян, так и при обработке клубней картофеля [12]. При экспозиции до 20 мин. на частотах 38 ГГц, 46 ГГц и 54 ГГц исследователи не наблюдали влияния микроволнового излучения на вес урожая картофеля клубней Felka Bona. Излучение на частоте 2,45 ГГц длительностью 10 с и мощностью микроволнового генератора 100 W, вызвали наибольший рост биомассы в семенных картофельных зародышах и увеличение веса клубней Felka Bona.

В экспериментах [13] наблюдалось существенное увеличение биомассы (до 66 %) с увеличением времени экспозиции от 12 минут до 20 минут по сравнению с контролем. В некоторых случаях биостимуляция проходит одновременно с дезинфекцией [14, 15]. Обработка семян МВ ЭМП является экологически чистым и эффективным методом [16]. Однако нет однозначных данных по режимам обработки различных семян в микроволновом поле, что не дает возможность с достаточной точностью прогнозировать результат. Это снижает эффективность применения метода.



Исследование сушки при микроволновом нагреве показывает возможность существенного сокращения затрат энергии [17]. Микроволновой нагрев в режимах сушки демонстрирует существенную интенсификацию процесса [18]. При увеличении выходной мощности магнетрона в 4 раза длительность сушки снижается примерно в 5 раз. Однако в работе не приводится анализ влияния вида материала и объема загрузки на необходимые характеристики, такие как длительность обработки и выходная мощность магнетрона. Продолжаются исследования микроволновой сушки фруктов и овощей [18, 19], однако сушка сырья с высоким влагосодержанием не представляется целесообразной. Это приводит к потере качества и большим затратам энергии, поскольку основным веществом, поглощающим электромагнитную энергию, является вода. Микроволновая сушка зерновых, уровень влагосодержания которых составляет 20...22 %, является перспективной. На примере исследования кинетики сушки крупы гречихи в микроволновом электромагнитном поле показано, что кривые сушки содержат периоды, наблюдаемые при других способах подвода теплоты [20]. Особое внимание уделяется изучению температурного поля в материале для установления рациональных режимов [21, 22]. Большое значение имеет анализ неоднородности нагрева, что вызвано формой материала и его составом, а также неоднородным распределением электромагнитного поля в микроволновой камере [22]. Анализ литературных данных [9, 12, 17] позволяет сделать следующий вывод. Существенными сдерживающими факторами применения методов микроволнового нагрева в различных технологиях является недостаточная полнота теоретических и экспериментальных исследований. Недостаток данных не позволяет прогнозировать эффекты, возникающие в материале под действием микроволнового поля.

2. Материалы и методы исследования

2.1. Характеристики материалов

Микроволновому воздействию подвергалось зерно, предназначенное для сушки, семена как посевной материал и солома. Выбор соломы объясняется широким применением в качестве субстрата для выращивания дереворазрушающих грибов. Исследования явлений биостимуляции проводилось на семенах пшеницы, сорт Одесская-267, сои рядовой, сорт Хаджибей, и кукурузы, сорт Одесская-10. При исследовании сушки в микроволновом поле использовалось зерно гречихи и пшеницы. Начальное влагосодержание зерна изменялось от 20 % до 22 %, начальная температура –



от 17 до 26 °С, масса – от 0,05 до 1,2 кг, толщина слоя – от 0,008 до 0,07 м, площадь поверхности образца, открытой для удаления влаги – от $8 \cdot 10^{-3}$ до $94 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Мощность магнетрона варьировалась от 80 до 800 Вт.

2.2. Схема экспериментальной установки и методика исследования

Схема экспериментальной установки для исследования эффектов воздействия микроволнового поля на растительную ткань, приведена на рис. 1.

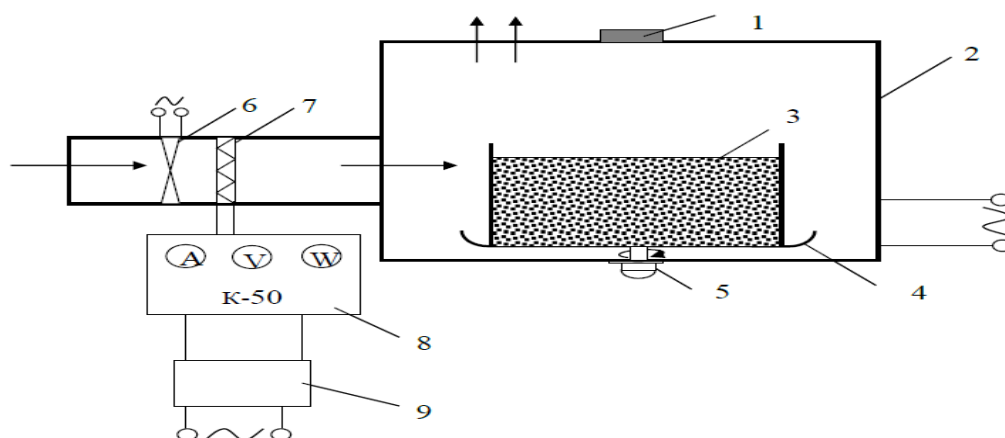


Рис. 1. Схема микроволновой экспериментальной установки: 1 – волновод; 2 – рабочая камера; 3 – экспериментальная ячейка; 4 – подставка; 5 – механизм привода; 6 – вентилятор; 7 – нагреватель; 8 – измерительный комплект; 9 – регулятор напряжения

Микроволновая энергия поступала в рабочую камеру прямоугольного сечения через волновод от магнетрона с частотой генерации 2,45 ГГц. Конструкция микроволновой камеры позволяла одновременно с подводом МВ энергии осуществлять продувку воздуха над слоем. При одновременном микроволновом и конвективном подводе теплоты воздух по воздуховоду нагнетался в камеру 2 вентилятором 6. Для контролируемого нагрева воздуха установлен нагреватель 7 с измерительным комплектом 8 и регулятором напряжения 9.

Методика исследования сушки зерновых заключалась в следующем. В экспериментальную ячейку помещался исследуемый материал, включался магнетрон. Через определенные интервалы времени весовым методом определялось количество испарившейся влаги и рассчитывалось влагосодержание (при исследовании процесса сушки).

Методика исследования влияния МВ поля на солому состояла в



следующем. Пшеничная солома предварительно заливалась горячей водой и отжималась до влагосодержания 73...75 %. Формировались пакеты массой 0,4 кг, которые затем помещались в МВ камеру. Включался магнетрон на заданное время. После окончания обработки пакет извлекался, измерялась температура соломы.

При изучении биостимуляции семена расфасовывались по бумажным пакетам по 0,1 кг. Выходная мощность магнетрона составляла 800 Вт. В микроволновую камеру также помещался стакан с водой (200 мл) для снижения уровня мощности, падающей на семена.

3. Экспериментальное исследование влияния микроволнового поля на растительную ткань

Область исследований данной работы охватывает следующие применения микроволнового нагрева материалов растительного происхождения: предпосевная обработка семян (биостимуляция), стерилизация растительного субстрата для производства дереворазрушающих грибов, сушка зерновых. Несмотря на свое разнообразие, растительные материалы имеют общую специфику, которая состоит в строении растительных клеток, анизотропии и наличия веществ со свойствами полярных диэлектриков. Основное, что отличает обрабатываемые растительные материалы в указанных методиках, – существенное различие во влагосодержании. При предпосевной обработке семян влагосодержание соответствовало равновесному, при подготовке субстрата – уровню влажности 73 %, при сушке влагосодержание находилось в пределах 20–22 %. Преследовались различные цели микроволновой обработки, что определяет ряд специфических задач для каждого из разрабатываемых методов.

3.1. Изучение эффектов влияния микроволнового электромагнитного поля на свойства семян

Пример результатов действия микроволнового поля на семена, приведен в табл. 1. Данные получены на основе описанной выше методики. Как показывают данные, в зависимости от экспозиции меняется значение энергии прорастания и лабораторной всхожести.

Высказано следующее предположение о механизме возникновения эффекта биостимуляции. При достаточно мягких режимах МВ-воздействия целостность растительной ткани не нарушается.



Таблица 1.

**Влияние МВ ЭМП на прорастание семян: 1 – пшеница Одесская-267,
2 – соя рядовая Хаджибей, 3 – кукуруза Одесская-10**

№	Режим	Энергия прорастания, %			Лабораторная всхожесть, %		
Культура		1	2	3	1	2	3
1	Контроль	71	42	53	74	48	72
2	МВ, 20 с	71	55	53	74	56	72
3	МВ, 30 с	73	55	53	76	57	74
4	МВ, 60 с	86	64	62	86	66	77
5	МВ, 90 с	86	68	68	88	68	81

В то же время транспортные свойства капиллярной системы (межклеточные структуры, поры плазматических мембран) улучшаются вследствие развития больших градиентов давления в замкнутых микрообъемах. Под воздействием микроволнового поля в клетке происходит активное выделение тепла. Повышается температура, вследствие чего жидкость клеточной ткани стремится расшириться. Объем клетки способен несколько увеличиться за счет воздухоносного межклетника. Однако увеличение времени МВ воздействия приводит к состоянию, когда все резервное пространство занято увеличившимся объемом, а поры в плазматической мембране не рассчитаны на массовый отток жидкости. Поэтому объем клетки можно считать фиксированным и процесс повышения температуры в клетке идет по изохоре. Как показывают оценочные расчеты, повышение температуры на 10 °С вызывает повышение давления в условиях постоянного объема до 60 бар – безусловно, для живой клетки такое давление недопустимо. На определяющую роль связи роста внутреннего давления и жесткости клеточных стенок указывает тот факт, что, к примеру, распушение целлюлозы носит взрывной характер. Большое гидравлическое сопротивление приводят к тому, что образующийся поток массы не может вырваться наружу, давление стремительно растет и этот процесс заканчивается разрушением ткани, такие режимы недопустимы.

В общем виде расчет граничной температуры предлагается проводить по следующему алгоритму: для каждой расчетной единицы определить



максимально допустимый объем V_k – т. е. тот объем, который может быть достигнут при термическом расширении протоплазмы; изменение температуры в процессе увеличения объема от V_0 до V_k определяется из соотношения:

$$\Delta t = \frac{V_k - V_0}{\beta V_0}, \text{ где } \beta - \text{коэффициент температурного расширения воды.}$$

3. Количество теплоты, поглощенной в этом процессе:

$$Q = Mc_p \Delta t + P \Delta V, \text{ Дж.} \quad (1)$$

Для дальнейших расчетов с целью повышения точности рекомендуется зависимость, которая позволяет определить количество теплоты, затраченное на нагрев всего объема зерна массой M до расчетной температуры:

$$Q = M \cdot c \cdot \Delta t, \text{ Дж.} \quad (2)$$

4. Время, в течение которого это тепло было получено:

$$\tau = Q / (q \cdot V), \text{ с,} \quad (3)$$

где V – объем материала, значение q определяется:

$$q = 0.556 \cdot 10^{-10} \varepsilon' \cdot \tan \delta \cdot E^2, \text{ Вт/м}^3. \quad (4)$$

В течение этого времени рост давления не будет критичным и семена проходят стадию биостимуляции. Далее клеточные стенки не в состоянии увеличивать свой объем. Внутри объекта при дальнейшем подводе энергии МВ поля начинает резко расти давление. В целом же теплота идет на увеличение температуры тела и изменение давления согласно первому закону термодинамики:

$$Q = \Delta H - V \Delta P, \text{ Дж.} \quad (5)$$

Связь температуры и давления можно задать только приближенно, т. к. уравнения состояния таких сложных смесей как протоплазма не существует. В первом приближении расчет рекомендуется проводить, приняв свойства протоплазмы равными свойствам воды. Пользуясь этими зависимостями, были проведены расчеты, целью которых было определение температуры и давления в конце процесса обработки в зависимости от влагосодержания и времени воздействия. При расчете давления предполагалось, что оболочки тела жестко фиксированы клеточными стенками, наиболее характерный для спор и склеротий. Расчет носит оценочный характер, однако позволяет предсказать реакцию биологического объекта на МВ-поле. Принималось, что объем растительной клетки зародыша зерна составлял $V_0 = 3,35 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$. Максимально допустимый объем клетки $V_k = 3,366 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$. Расчеты проводились для зерна



массой 0,1 кг. Теплоемкость зерна для пшеницы зависит от влажности W . Так, при $W = 33 \%$: $c = 2398$ Дж/(кг·К), при $W = 14 \%$: $c = 1852$ Дж/(кг·К).

На рис. 2 представлены результаты расчета граничных кривых по времени обработки семян пшеницы в микроволновой камере при выходной мощности магнетрона $P_{\text{вых}} = 1$ кВт в зависимости от влажности семян и при различных значениях начальной температуры. Начальная температура оказывает существенное влияние на значение допустимого времени обработки, что связано с зависимостью от температуры диэлектрических характеристик и коэффициента объемного расширения. При расчете предполагалось, что начальная температура зерна и температура окружающей среды одинаковы.

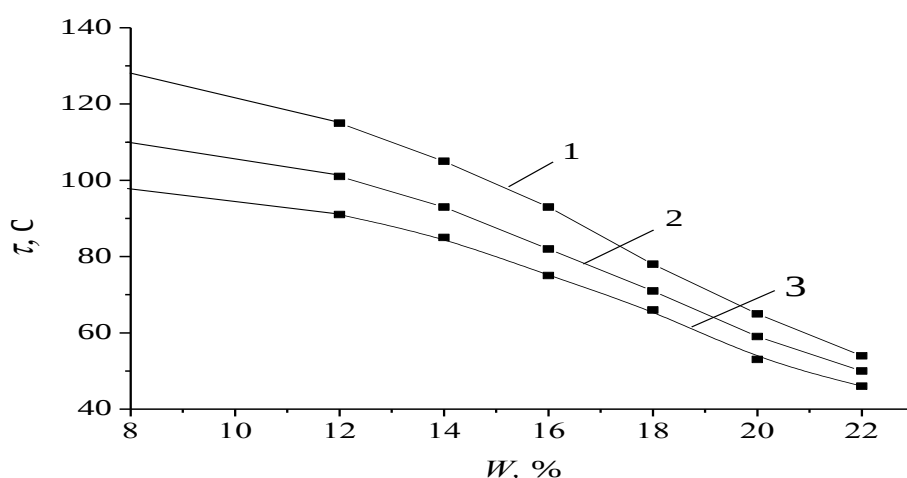


Рис. 2. Граничные кривые по времени обработки семян пшеницы в микроволновой камере. Выходная мощность магнетрона – 1 кВт: 1 – начальная температура 10 °С, 2 – начальная температура 15 °С, 3 – начальная температура 20 °С

Анализ результатов исследования влияния микроволнового поля на семена показал следующее. При темпе нагрева семян в микроволновой камере $\Delta t/\tau = 0,14\text{--}0,17$ К/с с влагосодержанием $u_0 = 8\text{--}12 \%$ при длительности $\tau = 50\text{--}130$ с (в зависимости от сорта семян) возникает эффект биостимуляции, проявляющийся в увеличении энергии всхожести и прорастания. При снижении удельной мощности эффект биостимуляции достигается путем увеличения продолжительности обработки: при обработке семян пшеницы для удельной мощности $q_v = 3,7 \cdot 10^4$ Вт/м³ экспозиция составляет $\tau = 180$ с.



3.2. Термообработка в микроволновом поле растительного материала как основы субстрата для дереворазрушающих грибов

Основной целью термообработки является уничтожение или угнетение микрофлоры, которая является конкурентной к культивируемому грибу.

Эффективность воздействия МВ обработки на режимах, при которых *Trichoderma* уничтожалась либо угнеталась, была проверена по следующей методике. Измельченную солому, предварительно замоченную на 48 часов, отжимали до влажности $W=73\%$. Обработка проводилась при мощности $P=800$ Вт. На аналитических весах формируются образцы по 0,4 кг, после охлаждения производилась инокуляция мицелием, после чего они помещались в полиэтиленовые пакеты. Основные результаты наблюдений за обрастанием образцов и выхода грибов приведены ниже. Результаты исследования свойств субстрата для выращивания грибов при различных режимах обработки и при различной начальной влажности представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Характер обрастания субстрата мицелием при различной экспозиции в микроволновом поле. Начальная влажность $W=73\%$

Режим	Экспозиция, с	Мощность, (кВт)	Конечная температура, °С	Результат
1	35	0,85	74	Наличие плесени
2	40	0,85	84	Обрастание мицелием удовлетворительное
3	45	0,85	87,5	Обрастание мицелием хорошее
4	50	0,85	93	Обрастание мицелием хорошее
5	120	0,3	72	Наличие плесени
6	140	0,3	83	Обрастание мицелием отличное
7	160	0,3	86	Обрастание мицелием хорошее
8	180	0,3	91	Обрастание мицелием хорошее
Контроль				Наличие плесени и триходермы

Оптимальный режим обработки соответствует экспозиции 140 с. Для этого режима КПД камеры составлял 80 %. Затраты энергии Q с учетом КПД



магнетрона $\eta_m = 75\%$:

$$Q = (m \cdot c_p \cdot \Delta t) / \tau / \eta_m = 0,4 \cdot 3600 \cdot 66 / 140 / 0,75 = 905 \text{ Вт.}$$

Определено, что при термообработке влажного растительного материала в микроволновом поле с темпом нагрева $\Delta t / \tau > 0,33 \text{ К/с}$ улучшаются его питательные качества, материал стерилизуется, продолжительность обработки сокращается в 45 раз по сравнению с традиционной стерилизацией.

Урожай грибов повысился на 40 % по сравнению с урожаем, получаемым при использовании традиционных технологий, при следующих режимных параметрах: удельная мощность $q_v = 9,6 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^3$, длительность обработки $\tau = 140 \text{ с}$. В рассмотренных режимах развитие конкурирующих грибов, в частности, триходермы (*Trichoderma*), подавляется.

3.3. Сушка зерновых материалов с применением микроволнового электромагнитного поля

На рис. 3 представлены характерные экспериментальные зависимости влагосодержания и температуры от длительности сушки в микроволновом поле при различной массе загрузки.

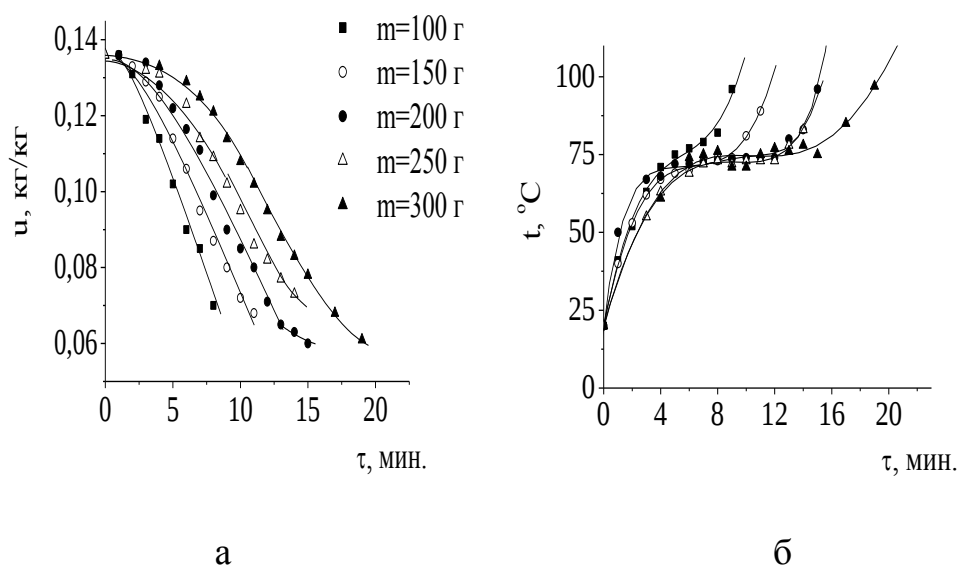


Рис. 3. Кинетика сушки зерна пшеницы в микроволновом поле при различной массе загрузки: а – изменение влагосодержания; б – изменение температуры

Процесс сушки можно разделить на периоды, характерные для коллоидных капиллярно-пористых тел при других способах подвода теплоты: прогрева (нулевой), постоянной (первый) и падающей (второй) скорости сушки,



Характер изменения температуры в первом периоде различался в зависимости от массы загрузки (рис. 3) и подводимой мощности. При значениях удельной мощности до $q = 450$ Вт/кг, температура практически не менялась. При увеличении удельной мощности температура возрастала, и при значениях $q > 600$ Вт/кг ее изменение было существенным. Период падающей скорости сушки определялся по изменению хода кривой влагосодержания: кривая становилась пологой. Температура в этом периоде всегда возрастает. Описанная картина была типична для всех материалов.

Как показали результаты исследований, скорость МВ сушки без перегрева зерна составляет $(0,8 - 6,2) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, что существенно превышает значения, полученные при других способах подвода теплоты. Так, для зерна скорость кондуктивной сушки составляла $0,3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, кондуктивно-конвективной – до $0,2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Возможность значительно интенсифицировать процесс свидетельствует о перспективности применения микроволнового поля для сушки зерновых. Эксперименты показали, что в оптимальном режиме скорость микроволновой сушки с одновременной продувкой слоя зерна воздухом составляла $12,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, при этом удельные затраты энергии на килограмм испаренной влаги составили 5,65 МДж/кг.

В процессе МВ нагрева влажного зерна избыточное давление внутри слоя начинает повышаться. На поверхности слоя избыточное давление равно нулю, и максимально – в центре. В слое возникает градиент общего давления, который является движущей силой фильтрационного переноса. С целью обнаружения эффекта повышения давления в слое зерна была составлена следующая методика. В микроволновую камеру помещалась емкость со слоем гречихи высотой 11 см, в центре которого измерялось избыточное давление с помощью U-образного керосинового манометра. Выбор керосина обусловлен тем, что он не поглощает микроволновую энергию. Лавинообразное повышение давления возникало, когда температура превышала 70 °С. При этом толщина слоя составляла 0,1 м. Максимально возможное избыточное давление внутри слоя равнялось 640 Па. При достижении этой величины наблюдался самопроизвольный мгновенный сброс давления.

Специфика микроволнового нагрева заключается в объемном характере поглощения материалом микроволновой энергии. Плотность потока микроволновой энергии максимальна в поверхностных слоях, при продвижении вглубь материала поток ослабляется по экспоненциальному закону. Поэтому



для оценки неравномерности температуры и влагосодержания особый интерес представляла кинетика послойной сушки. С этой целью была изготовлена экспериментальная ячейка, которая состояла из трех слоев, разделенных радиопрозрачными сетками. Масса каждого слоя составляла 0,1 кг, толщина – 0,009 м, диаметр – 0,135 м, площадь поверхности, открытой для удаления пара – $14,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

В ходе эксперимента определялось изменение влагосодержания и температуры гречихи по высоте слоя в процессе сушки. Открытой для поглощения МВ энергии и отвода пара была только верхняя поверхность образца, боковая и нижняя поверхности были тепло- и влагоизолированы. Кривые кинетики послойной сушки представлены на рис. 4, из которых видно, что интенсивнее всего сушка протекала в среднем слое.

В этом эксперименте масса слоя $m = 0,1 \text{ кг}$, толщина $l = 0,009 \text{ м}$, $P_{\text{вых}} = 160 \text{ Вт}$. Влагосъем в верхнем слое был несколько слабее (рис. 4, а). Это связано с тем, что температура верхнего слоя несколько ниже второго (рис. 4, б). Была обнаружена еще одна особенность: влагосодержание третьего слоя с течением времени повышалось, достигая 0,215 кг/кг (начальное влагосодержание – 0,2 кг/кг). Следовательно, влага из верхних слоев материала проникала вниз, по всей видимости, за счет механизма термодиффузии и сил гравитации.

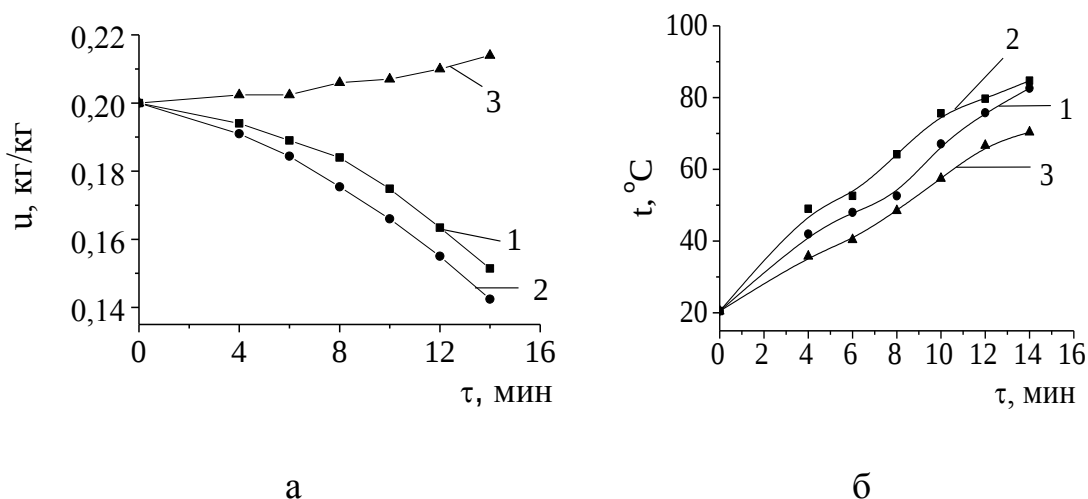


Рис. 4. Кинетика послойной сушки гречихи в микроволновом поле:

а – изменение влагосодержания; б – изменение температуры; 1 – верхний слой; 2 – средний слой; 3 – нижний слой

Обращает на себя внимание следующая особенность – несмотря на растущее влагосодержание в нижнем слое, т. е. увеличение доли полярного



диэлектрика («приемника» микроволнового излучения) в этом объеме материала, температура его остается ниже температуры второго и третьего слоев. Эксперименты, проведенные на ячейке, состоящей из четырех слоев, показали, что нижний (четвертый) слой также имеет наименьшую температуру и наибольшее влагосодержание, которое, как и в предыдущем опыте с тремя слоями, увеличивалось во времени.

Таким образом, влагосодержание нижнего слоя увеличивается независимо от толщины образца. Причиной снижения температуры образца на границе слоя с основанием камеры является передача теплоты теплопроводностью от экспериментальной ячейки. Подобная неравномерность не наблюдалась при использовании сетчатой ячейки, которая свободно пропускала пар во всех направлениях. В этом случае температура слоев материала различались не более чем на 4 °С, а влагосодержание – на 0,007 г/кг. Сопоставление данных по кинетике сушки, полученных на ячейке со сплошным и радиопрозрачным сетчатым днищем, подтвердило важность рациональной организации отвода пара. Так, если в первом случае среднее влагосодержание образца уменьшилось с 0,2 кг/кг до 0,17 кг/кг за 14 мин, то во втором – за 7,5 мин. Неравномерность распределения температуры и влагосодержания возникает в условиях, когда выход пара через нижнюю и боковую поверхности затруднен.

Энергетическая эффективность теплового эффекта взаимодействия диэлектрических материалов с микроволновым полем

Одной из ключевых проблем являлось определение условий максимально возможного преобразования энергии микроволнового электромагнитного поля во внутреннюю энергию исследуемого материала. Для анализа специфики поглощения микроволновой энергии материалом большое значение имели исследования зависимости величины поглощенной микроволновой энергии от загрузки камеры. Выражение общего КПД представляется в следующем виде: $\eta = \eta_m \cdot \eta_k$, где η_m – КПД магнетрона, η_k – КПД микроволновой камеры. Значение η_m показывает, с каким КПД магнетрон преобразует энергию электрического поля промышленной частоты (50 Гц) в энергию с частотой микроволнового поля. Эта величина является паспортной. Значение η_k зависит от условий согласования магнетрона с волноводом и загружаемым материалом, вследствие сложности ее предсказания возникает необходимость в проведении масштабных экспериментов. В первую очередь для исследований была выбрана



вода, как вещество, электрофизические свойства которого хорошо изучены. Способность воды поглощать микроволновую энергию приближается к максимальной вследствие высокой полярности молекул.

КПД камеры рассчитывается как отношение теплоты, преобразованной материалом Q_{Σ} , к выходной мощности магнетрона $Q_{\text{м}}$ включает в себя значение полезного теплового потока $Q_{\text{пол}}$, потери в окружающую среду в результате естественной конвекции $Q_{\text{конв}}$ и лучистого теплообмена между образцом и стенками камеры ($Q_{\Sigma} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{конв}} + Q_{\text{луч}}$):

$$\eta_k = \frac{Q_{\Sigma}}{P_{\text{вых}}} \quad (6)$$

Для изучения зависимости КПД от загрузки камеры использовалась вода при начальной температуре 20 °С, масса изменялась от 0,05 до 1,1 кг. Выходная мощность микроволнового источника составляла 800 Вт. Видно (рис. 5), что с ростом массы воды общий КПД непрерывно возрастает, достигая своего максимального значения $\eta_k = 90\%$ при $m = 1,1$ кг, что позволяет говорить о достижении оптимальной загрузки камеры.

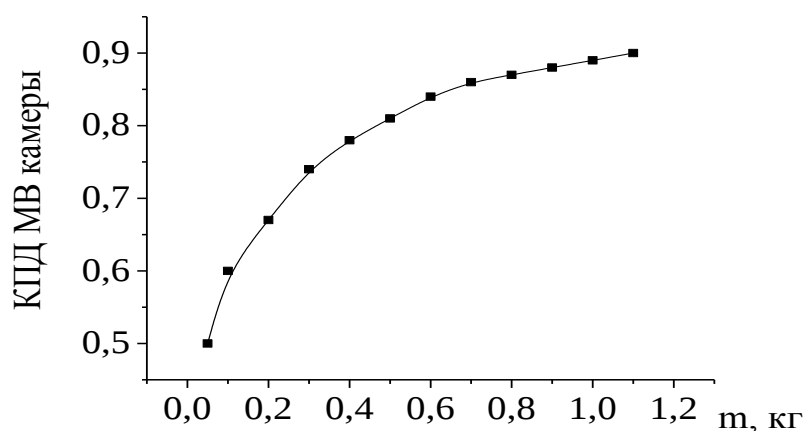


Рис. 5. Зависимость КПД микроволновой камеры от массы воды при $P_{\text{вых}} = 800 \text{ Вт}$

Материалы растительного происхождения имеют свою специфику, заключающуюся в структурных особенностях и химическом составе, однако для оценки мощности, выделяющейся в виде теплоты, основное значение имеет влагосодержание этих материалов. Способность растительных материалов поглощать МВ энергию существенно ниже воды, поэтому КПД камеры при обработке зерновых материалов ниже. Для ряда зерновых материалов (овес,



пшеница, ячмень, гречиха) получена эмпирическая зависимость, которая учитывает полноту загрузки камеры за счет введения симплекса V_M/V_K , где V_M – объем, занимаемый материалом, V_K – объем камеры:

$$\eta_K = 0,67 \left(1 - \frac{0,45}{1 + e^{\left(\frac{V_M/V_K - 0,003}{0,0017} \right)}} \right) \left(\frac{u}{u_0} \right)^{1,3}, \quad (7)$$

где u – текущее влагосодержание, $u_0 = 0,2$ (начальное влагосодержание). При изменении относительного объема V_M/V_K от 0,0015 до 0,03 погрешность определения КПД камеры составляет $\pm 17 \%$. Данные по КПД предлагается использовать для оценки теплоты, преобразованной в материале при взаимодействии с микроволновым полем, в соответствии со следующей зависимостью:

$$q = \frac{P_{\text{вых}} \cdot \eta_K}{V} \text{ Вт/м}^3, \quad (8)$$

где V – объем, занимаемый материалом, $P_{\text{вых}}$ – выходная мощность магнетрона.

Зависимость (8) позволяет определить энергетическую эффективность преобразования микроволновой энергии во внутреннюю энергию материала.

Благодаря полученным данным по эффектам нагрева в МВ поле, появляется возможность прогнозирования изменений в растительной ткани.

Подтверждено значительное влияние влагосодержания на темп нагрева.

Также появилась определенность в вопросе расчета граничной длительности нагрева семян при биостимуляции. Методика расчета граничного времени составлена на основе гипотезы возникновения биостимулирующего эффекта.

Обнаруженные особенности нагрева и сушки влажного зерна целесообразно использовать при конструировании микроволновых сушилок. Получено, что при превышении температуры слоя 70°C возникает лавинообразное повышение давления.

Также установлено, что при микроволновой сушке могут возникать условия, при которых влагосодержание нижнего слоя зерна будет увеличиваться. Для равномерной и интенсивной сушке слой зерна должен быть обеспечен свободный выход испаренной влаги.

Преимуществами данных исследований является определение условий



эффективной термообработки в микроволновом поле, которые получены благодаря комплексному изучению эффектов взаимодействия МВ поля с растительными материалами.

Особое значение имеет предложенный подход к оценке теплоты, полученной при преобразовании МВ энергии во внутреннюю.

Кроме того, получены экспериментальные данные по эффекту лавинообразного нарастания давления в слое влажного зернового материала и по послойной сушке. Знание этих явлений позволяет лучше понять процессы нагрева в микроволновом поле.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования семян в микроволновом поле выявили возникновение эффекта биостимуляции. Показано, что условия получения оптимального эффекта биостимуляции зависят от вида семян и длительности обработки. Так, при 90 с обработки отмечалось повышение лабораторной всхожести и энергии прорастания пшеница, сои и кукурузы. При этом темп нагрева в оптимальных режимах различен: для пшеницы – 0,15 К/с, кукурузы 0,14 К/с, сои – 0,17 К/с.

Для оценочного расчета граничного времени выдержки семян в микроволновом поле предложена методика, устанавливающая время нагрева до достижения изохорного процесса в растительной клетке. Превышение этого времени приведет к разрушению клеточных стенок и угнетению роста семян.

Обнаружено эффективное стерилизующее действие микроволновой термообработки увлажненной соломы, которое заключается в уничтожении конкурентных спор и улучшении условий для прорастания культивируемых дереворазрушающих грибов. Обнаружен оптимальный режим микроволновой обработки влажной соломы для приготовления субстратов. Для массы 0,4 кг оптимальная длительность обработки составляет 140 с при выходной мощности магнетрона 800 Вт.

Проведенное исследование сушки зерна в микроволновом поле обнаружило возникновение эффектов лавинообразного повышения давления в слое. В этих условиях температура превышает 70 °С при толщине слоя 0,1 м и выход пара с боковой поверхности и дна затруднен. В таких же условиях сушка приобретает крайне неравномерный характер, причем влагосодержание нижнего слоя может вырасти выше начального. Интенсивнее всего проходит сушка среднего слоя.



Исследована энергетическая эффективность преобразования микроволновой энергии во внутреннюю энергию материала в зависимости от его вида, загружаемого объема и влагосодержания.

Получено, что для сушки зерновых с начальным влагосодержанием 20 % КПД микроволновой камеры не превышает 67 %. Для нагрева воды КПД микроволновой камеры может достичь 90 %. Предложена зависимость для расчета значения микроволновой энергии, поглощенной заданным объемом обрабатываемого материала. При этом необходимо располагать данными по КПД микроволновой камеры, которые определяются экспериментальным путем.