

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА СОСНОВЫХ ШИШЕК ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ НИХ СЕМЯН ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА

*А.З. Петрова, Г.А. Морозов, И.Т. Шакиров*

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ  
Российская Федерация, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10

**Аннотация:** Цель исследования – оценить влияние микроволнового облучения шишек сосны на качество получаемых семян. Шишки подвергались воздействию микроволнового излучения, производимого генератором мощностью 700-800 Вт. Исследование проводилось в нескольких режимах, в которых переменным параметром являлась продолжительность микроволнового облучения. Распределение температуры на поверхности и внутри конусов определяли с помощью специального термометра. Оценивали также энергию (жизнеспособность) и всхожесть (класс качества) семян, обработанных микроволновым излучением. Результаты исследований позволили констатировать, что при принятых параметрах процесса возможно получение семян второго класса качества после воздействия микроволн в течение 6 с. При увеличении времени облучения свыше 6 с жизнеспособность семян снижалась, а их качество было неудовлетворительным.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная; семена; электромагнитное излучение; температура; класс качества семян; всхожесть.

### Введение

В настоящее время известно много работ, которые направлены на минимизацию времени экстракции семян сосны с целью увеличения объемов их производства. В них рассмотрены методы повышения температуры экстракции, снижения давления в сушильной камере (вакуумизация), механической обработки шишек (например, обрезка основания), сортировки шишек по размеру или замачивания шишек перед экстракцией, изменения влажности внутри камеры для сушки [1-3].

Анализ существующей литературы по указанной теме [4-5] позволил выявить проблемы получения семян хвойных деревьев. Микроволновая обработка рассматривается как одно из средств интенсификации процесса. Сушка микроволновым облучением за счет объемного нагрева является одним из лучших методов по обработке биологических объектов. Однако воздействие микроволнами на биологические объекты приводит к структурным изменениям тканей, микроскопическим трещинам и другим биофизическим нарушениям [6-8].

К снижению или потере жизнеспособности семян после микроволнового облучения приводит быстрое повышение температуры обрабатываемых шишек. В [1,3] были проведены исследования по определению максимального времени воздействия для извлечения семян хорошего качества. При сушке микроволнами хоть и обеспечивается объемный нагрев, температура внутри шишек отличается от значений на их поверхности. На основании вышеупомянутых исследований нельзя однозначно утверждать, является ли короткое микроволновое воздействие вредным для биологических материалов.

Экстракция шишек для получения семян является энергозатратным процессом. Одним из методов ограничения энергозатрат может быть внедрение более совершенных методов управления процессом, однако это будет возможным после выявления признаков

экстракции: изменение температуры и влажности внутри камеры, изменение температуры сухого материала и содержания в нем воды [9, 10].

Недавно были изучены новые решения для улучшения процесса выделения семян. Были предприняты попытки разработать рекомендации по созданию небольших экстракционных устройств, в которых могут быть использованы усовершенствованные технологии экстракции [3]. Например, использование микроволнового облучения только на начальной стадии сушки, многоступенчатый нагрев, вакуумная сушка с контролем влажности внутри камеры. Комбинирование этих методов позволит не испортить биофизические свойства нагреваемых объектов, а также сократить время экстракции и энергозатраты.

Цель исследования – оценить влияние микроволнового облучения шишек сосны на качество получаемых семян. Шишки подвергались воздействию микроволнового излучения, производимых генератором мощностью 700-800 Вт. Исследование проводилось в нескольких режимах, в которых переменным параметром являлась продолжительность микроволнового облучения. Распределение температуры на поверхности и внутри конусов определяли с помощью специального термометра. Оценивали также энергию (жизнеспособность) и всхожесть (класс качества) семян, обработанных микроволновым излучением. Для этого предварительно были изучены физические параметры шишек, такие как вес, длина и толщина. Был проведен анализ температуры внутри шишек и оценено качество семян на основе их всхожести.

### 1. Массогабаритные характеристики шишек

Статистика массогабаритных характеристик шишек, использованных в исследовании, представлена в таблице 1. Результаты были получены для двух типов конусов, первые из которых имели параметры в типичном для России диапазоне (группа (а)), где длина шишек колеблется от 55,3 до 70 мм, а вес от 6 до 9,4 г. У другой группы (группа (в)) длина составляла от 71 до 94 мм, а вес от 8,4 до 18,2 г. Среднее содержание влаги составляло 20% для группы (а) и 32% для группы (в).

Таблица 1. Массогабаритные характеристики шишек

Статистика	Длина (мм)	Толщина (мм)	Начальный вес (г)	Длина (мм)	Толщина (мм)	Начальный вес (г)
Группа	(а)			(в)		
Среднее	64,48	17,71	7,41	80,17	20,33	13,2125
Минимум	55,3	15,8	6	71	19,1	8,4
Максимум	70	19,7	9,4	94	22	18,2
Диапазон	14,7	3,9	2,4	23		9,8
Стандартное отклонение	3,794	0,971	1,101	7,239	1,164	3,375
Коэффициент вариации	0,061	0,055	0,149	0,090	0,057	0,255

Корреляционный анализ был проведен для двух типов размерностей шишек. Он показал положительную корреляцию между толщиной (D, мм) и длиной (L, мм) шишек в исследуемой партии. Это было описано линейным уравнением (1) для первого типа размерности (группа (а)) и линейным уравнением (2) для второго типа (группа (в)), где коэффициенты корреляции превысили критическое значение  $r = 0,1430$  (которое обычно зависит от степени уравнения и размера выборки). Первое уравнение показывает, что увеличение длины конуса на 1 мм соответствует увеличению толщины конуса примерно на 0,2 мм:

$$L = 0,1949D + 5,4986; r = 0,7612. \quad (1)$$

По второму - можно видеть, что увеличение длины конуса на 1 мм соответствует увеличению толщины конуса примерно на 0,11 мм:

$$L = 0,1104D + 11,486; r = 0,6861. \quad (2)$$

## 2. Микроволновое облучение и распределение температуры

В исследовании использовались два типа генераторов СВЧ энергии с разным типом распределения волны в нагреваемом объеме. Первый лабораторный генератор СП23-1 (Печь СВЧ бытовая «Электроника», СССР) имеет мощность 775 Вт и питается от переменного напряжения 230В с частотой тока 50Гц. Камера печи имеет размеры 255×390×330 мм. Равномерность электромагнитного поля в камере обеспечивается за счет вращающегося диссектора, что обеспечивает равномерный нагрев тела. Второй тип генератора MS-2007M (Elenberg, Китай) имеет выходную мощность 700 Вт и питается от той же сети напряжением 230В с частотой тока 50Гц. Камера второй печи имеет размеры 262×452×322 мм. В этой печи не предусмотрено перераспределение поля внутри камеры, поэтому равномерность нагрева объекта обеспечивается поворотным столом.

Температура нагреваемых конусов измерялась с помощью штывевого термометра (модель термометра), с длиной и диаметром штывря 85 и 3 соответственно. Диапазон измерения температуры прибора составляет от  $-50^{\circ}$  до  $750^{\circ}$  градусов с погрешностью  $0,01^{\circ}$ . Так как основной нагрев происходил внутри тела, для измерения в исследуемых объектах по центру вдоль длинной части были проделаны отверстия сверлом диаметром 6 мм. В качестве погрешности необходимо также учитывать энергоемкость штывевого датчика, выполненного из металла, так как объекты в микроволновой печи нагревались неравномерно.

В ходе исследования была проанализирована динамика изменения влажности нагреваемых конусов. Для этого измерялась масса каждой шишки до и после СВЧ облучения. Изменение массы регистрировалось с помощью точных весов MW1200. Предел измерения весов составляет 1200 г при погрешности 0,01г. Содержание влажности в процентном соотношении вычислялось относительно эталонного объекта, масса которого была измерена до и после полной сушки.

Перед микроволновой обработкой размеры исследуемых объектов были измерены с помощью механического штангенциркуля с погрешностью 0,1 мм.

## 3. Режимы измерения

Два основных режима Г1 и Г2 (исходя из типа генератора) включают в себя зависимости от размерности конусов (по крупнее и мельче), времени облучения и количества шишек, помещенных в СВЧ камеру. В результате в общей сложности было получено 16 комбинаций (табл. 2).

Таблица 2. Режимы измерения

Режим	Варианты по размерностям конусов	Варианты по количеству конусов	Количество конусов (шт)	Время облучения конусов (с)
Г1	Г1а	I	3	6, 12, 18
		II	5	
	Г1в	I	3	
		II	5	
Г2	Г2а	I	3	
		II	5	
	Г2в	I	3	
		II	5	

В двух режимах (Г1 и Г2) использовались оба типа размеров конусов (Г1 (а,в) и Г2 (а,в)) с разным их количеством 3 или 5 штук. Для каждого режима было применено три различных времени электромагнитного облучения. Для каждого режима было произведено по 3 итерации. На конечном этапе измерения были выполнены для 6 конусов в каждом первом (Г1 (а,в) I) режимах и 10 конусов в каждом втором (Г2 (а,в) II) для одной итерации эксперимента.

#### 4. Потеря веса под воздействием микроволн

Потеря веса в исследуемых конусах в результате микроволнового облучения в двух режимах (т.е. с учетом их размерности), но без учета количества конусов указана в табл. 3.

Таблица 3. Потеря веса

Режим	Время экспозиции		
	6 (с)	12 (с)	18 (с)
Г1а	0,061 (г)	0,12 (г)	0,192 (г)
Г1в	0,072 (г)	0,165 (г)	0,321 (г)
Г1	0,068 (г)	0,141 (г)	0,256 (г)
Г2а	0,06 (г)	0,213 (г)	0,523 (г)
Г2в	0,053 (г)	0,219 (г)	0,553 (г)
Г2	0,056 (г)	0,216 (г)	0,538 (г)

Для печи с диссекторным распределением поля (режим Г1) потеря веса для конусов без учета их размерности после микроволнового облучения составила в среднем 0,068 г через 6 с, 0,12 г через 12 с и 0,256 г через 18 с.

Линейная зависимость между потерей веса и временем воздействия микроволн была описана уравнением (3) и показана на рисунке 1.

$$y_{Г1} = 0,0157x - 0,034, \quad (3)$$

где  $y_{Г1}$  – потеря веса (г), Г1 – режим (таблица 2),  $x$  – время воздействия микроволн (с).

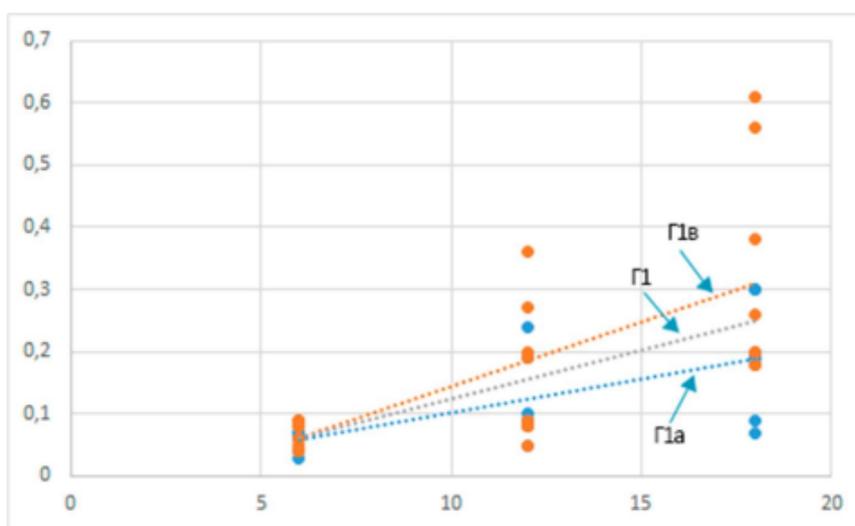


Рис. 1. Зависимость между потерей веса и временем облучения для первого типа камеры (режим Г1)

На рис. 1 видно, что более длительный нагрев способствовал увеличению потери массы для каждого интервала времени. Линия тренда показывает, что увеличение времени нагрева конуса с 6 до 12 с увеличило потерю веса на 0,073 г, а с 12 до 18 с на 0,115 г.

Статический анализ показал значительное влияние времени воздействия микроволн на потерю веса конуса ( $p < 0,01$ ). Чем больше было время воздействия, тем больше была потеря веса.

Потеря веса в шишках в режимах Г1а и Г1в, то есть для конусов стандартных и больших размеров, помещенных в микроволновую камеру на 6, 12 и 18 с, представлена в таблице 3 и показана на рис. 1. Потеря веса для режима Г1а составила в среднем 0,061 г через 6 с, 0,12 г через 12 с и 0,192 г через 18 с. Для режима Г1в изменение массы конусов составляло 0,072 г через 6с, 0,165 г через 12 с и 0,321 г через 18 с.

Зависимости от продолжительности микроволнового облучения для режимов Г1а и Г1в были описаны линейными уравнениями (4) и (5) соответственно:

$$y_{Г1а} = 0,0107x - 0,0054, \quad (4)$$

$$y_{Г1в} = 0,0207x - 0,0625. \quad (5)$$

Из рис. 2 по линиям тренда Г1а и Г1в видно, что конусы с большими размерностями, с увеличением длительности воздействия микроволн, теряли большую массу, чем конусы со стандартными размерами.

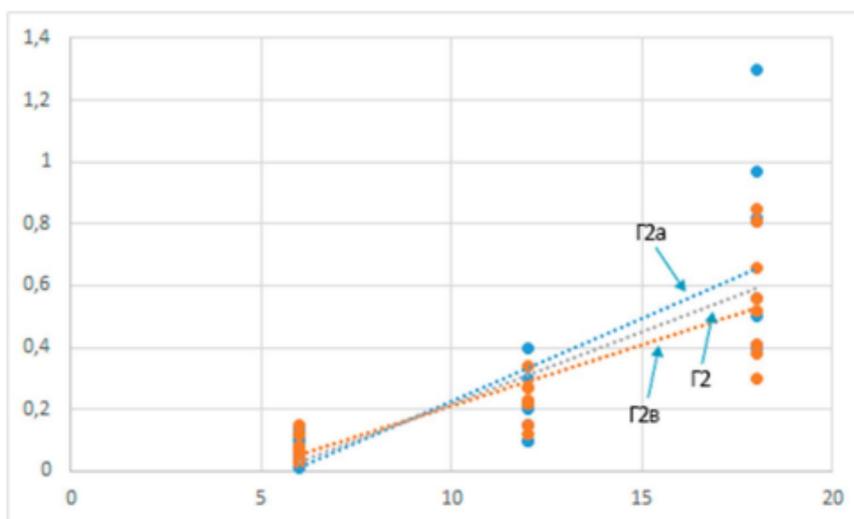


Рис. 2. Зависимость между потерей веса и временем облучения для второго типа камеры (режим Г2)

Для интервала с 6 до 12 с средняя разница составляла 0,045 г, а с 12 до 18 с 0,129 г. Анализ показал связь между потерей веса и размерностью шишек для всего интервала времени ( $p < 0,01$ ). Поствыборочный тест не выявил различия в изменении массы между двумя размерностями конусов для экспозиции 6 с ( $p = 0,57$ ), но показал влияние на потерю веса в случае 12 с ( $p < 0,01$ ) и 18 с ( $p < 0,01$ ).

Для печи с поворотным столом потеря веса для режима Г2 так же без учета размерности шишек после облучения составила в среднем 0,056 г через 6с, 0,216 г через 12 с и 0,538 г через 18 с. Линейная зависимость между потерей веса и временем воздействия микроволн была описана уравнением (6)

$$y_{Г2} = 0,0401x - 0,2115. \quad (6)$$

Видно, что более длительный нагрев конусов способствовал увеличению потери массы аналогично конусам, подвергнутых облучению в режиме Г1.

Как и в режиме Г1, статически значимая разница наблюдалась между средней потерей веса в шишках при различном времени воздействия ( $p < 0,01$ ). Потеря веса увеличивалась вместе с увеличением времени воздействия микроволн.

Изменение массы сосновых шишек в зависимости от времени воздействия и их размерности в режимах Г2а и Г2в представлено в таблице 3 и показано на рисунке 2. Потеря веса для режима Г2а составила в среднем 0,06 г через 6 с; 0,213 г через 12 с и 0,523 г через 18 с. Для режима Г2в изменение массы составило 0,053 г через 6 с; 0,219 г через 12 с и 0,553 г через 18 с. Зависимости от продолжительности микроволнового облучения для режимов Г1а и Г1в были описаны линейными уравнениями (7) и (8) соответственно:

$$y_{Г2а} = 0,0417x - 0,2254, \quad (7)$$

$$y_{Г2в} = 0,0401x - 0,2115. \quad (8)$$

Аналогичная зависимость потери веса в шишках наблюдалась в режимах Г1а и Г1в (рис. 1). Как и в первом режиме исследования, несколько большая потеря веса в абсолютном, так и в относительном выражении, произошла в шишках с большими размерами.

Линия тренда для конусов режима Г2а выше, чем для режима Г2в, по ним можно сделать вывод, что шишки с большими размерами потеряли чуть больше влаги. Статический анализ показал отсутствие связи между временем воздействия и размерностями конусов ( $p = 0,9$ ).

После сравнения динамики изменения массы для двух типов камер, то есть между режимами Г1 и Г2, можно сделать вывод о влиянии устройства распределения электромагнитного поля на результаты изменения веса конусов в ходе их облучения.

Поствыборочный тест показал схожесть результатов для экспозиции 6 с ( $p = 0,3$ ) и 12 с ( $p = 0,06$ ), но для другого времени воздействия - 18 с, измерения, полученные для двух режимов, отличались ( $p < 0,01$ ). При сравнении результатов потери веса в зависимости от времени облучения с помощью ANOVA анализа, был сделан вывод о влиянии типа камеры на показатели веса шишек ( $p < 0,01$ ).

## 5. Анализ всхожести и энергии прорастания семян

Результаты, касающиеся всхожести и энергии прорастания, а также качества семян для режимов исследования, представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты по всхожести и энергии прорастания

Режимы	Количество нагреваемых шишек (шт)	Время излучения (с)	Энергия прорастания (%)	Всхожесть (%)	Класс качества
Г1	3	6	72	81	II
		12	40	43	некачественный
		18	4	5	некачественный
	5	6	76	83	II
		12	49	57	некачественный
		18	7	9	некачественный
Г2	3	6	64	65	некачественный
		12	15	17	некачественный
		18	0	0	некачественный
	5	6	72	81	II
		12	33	40	некачественный
		18	2	3	некачественный

В режиме Г2 семена, подвергнутые микроволновому облучению, для времени воздействия 12 и 18 с достигли самого низкого класса качества, поскольку их энергия прорастания была ниже порога 50%, а всхожесть – ниже 70%. Для времени облучения 6 с семена достигли второго класса качества, попадая в диапазон от 70% до 84% для энергии прорастания и от 81% до 90% для всхожести, указанные в стандарте [11].

При облучении семян в первом типе камеры для времен воздействия 12 и 18 с семена также оказались некачественные, так как они не попадали в диапазон в соответствующем стандарте. Однако при времени микроволнового воздействия 6 с семена по энергии прорастания и всхожести попадали под диапазон стандарта от 70% до 84% для энергии прорастания и от 81% до 90% для всхожести и были охарактеризованы как класса качества II.

В контрольных образцах (не подвергавшихся воздействию микроволнового излучения) семена достигли прорастания 73% и всхожести 85%, поэтому их можно отнести к классу качества II (однако время обработки каждой шишки измерялось десятками минут). При времени микроволнового воздействия 6 и 12 с, во всех режимах исследования наблюдалась взаимосвязь между жизнеспособностью семян (энергией и мощностью прорастания) и количеством (общим весом) шишек, помещенных под микроволновый генератор. Увеличение количества шишек, подвергающихся микроволновому облучению, привело к увеличению энергии прорастания семян и увеличению их всхожести.

### Заключение

В данной работе был произведен анализ влияния характеристик микроволнового нагрева на качество извлекаемых семян. В ходе исследования лучшие результаты по потере веса и температурному распределению были получены для второго типа камеры, с поворотным столом. Однако анализ всхожести семян подтвердил, что качество семян получается лучше при облучении шишек в камере с диссекторным распределением поля.

Для обоих типов камер потеря веса увеличивалась с увеличением времени воздействия, однако по проведенным статическим тестам, после 12 с воздействия разницы в максимальных температурах не наблюдалось. Проведенные исследования показали, что сортировка шишек по размерности позволяет не перегреть семена, чтобы тем самым не сделать их некачественными.

Учитывая все условия проведенных экспериментов, можно сделать вывод о значительном снижении жизнеспособности семян после 6 с облучения. Для шишек, высушенных в течении 18-секундного воздействия были получены наихудшие результаты всхожести и энергии прорастания.

Основным недостатком метода является необходимость сверления в шишках отверстий и использования термометров, только после цикла нагрева. В дальнейших исследованиях предполагается использование бесконтактного метода измерения температуры и веса [12-15].

### Список источников

1. *Aniszewska, M.* The change in weight and surface temperature of a pine cone (*Pinus sylvestris* L.) as a result of microwave irradiation// For. Res. Pap. – 2016. – 77. – P. 56–67.
2. *Antosiewicz, Z. Zał ,eski, A.* Technika i technologia wyłuszczenia nasion sosny, 'swierka i modrzewia w Polsce // Las Pol. -1987, 23. - P. 7–11. (In Polish)
3. *Aniszewska, M.* Changes in humidity and temperature inside the pine cones (*Pinus sylvestris* L.) in two stages seed extraction // For. Res. Pap. – 2013. – 74. – P.205–214.

4. *Zal ęski, A. Ani'sko, E.* Suszenie nasion wybranych gatunków drzew // Not. Nauk. Inst. Badaw. Le'snictwa 2003. – 1. – P. 1–4. (In Polish)
5. *Zal ęski, A.* Nasiennictwo Le'snych Drzew i Krzewów Iglastych [Seeds of Forest Trees and Coniferous Shrubs]; Oficyna Edytorska Wydawnictwo Swiat: Warszawa, Poland, 1995; ISBN 978-83-85597-27-8. (In Polish)
6. *Xu, F., Chen, Z., Huang, M., Li, C., Zhou, W.* Effect of intermittent microwave drying on biophysical characteristics of rice // J. Food Process Eng. – 2017. - 40, e12590. [CrossRef]
7. *Isaev, A.V., Bastron, A.V. Yakhontova, V.S.* The research of unevenness degree influence of heating of colza seeds in EMF UHF on their energy of germination and viability// Bull. KrasGAU. – 2016. – 4. –P. 131–137.
8. *Mishra, R.; Dash, A.; Pattanaik, S.; Nayak, P.; Mohanty, R.* Seed Germination and Seedling Survival Percentage of Shorea robusta Gaertn.f. in Buffer Areas of Similipal Biosphere Reserve, Odisha, India. - J. Ecosyst. Ecograph. – 2015. – 4. - 153.
9. Многосенсорная система контроля температуры и влажности для реализации адаптивных процессов СВЧ-обработки органических отходов животноводства, *Смирнов С.В.* диссертация канд. техн. наук. Казань. – 2021.
10. *Смирнов, С.В.* Математическое моделирование и экспериментальное исследование процесса микроволновой сушки органических отходов / С.В. Смирнов, В.И. Анфиногентов, Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Н.Е. Стахова // «Вестник НЦБЖД», 2020 – №3(45) – С. 142 – 149.
11. ГОСТ Р 50617-2000. Семена основных лесообразующих хвойных пород. Технические условия.
12. Пат. 2777526 С1 Российская Федерация. Способ измерения распределения теплового поля нагрева СВЧ-излучением и устройство для его осуществления / Кувшинов Н. Е., Мисбахов Рин. Ш., Мисбахов Рус. Ш., Морозов О. Г., Морозов Г. А., и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». – №2021126076/28(055130); заявл. 03.09.2021; опубл.: 05.08.2022.
13. Кувшинов, Н.Е. Радиофотонная система измерений распределения температур и интенсивности электромагнитного поля в рабочей камере лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона / Н.Е. Кувшинов, Рин.Ш. Мисбахов, Рус.Ш. Мисбахов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2021. – № 3 (51). – С. 77-92.
14. Кувшинов, Н.Е. Математическая модель микроволнового нагрева обрабатываемой среды и термопреобразователей для контроля распределения температуры модернизированным калориметрическим методом / Н.Е. Кувшинов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2021. – № 3 (51). – С. 103-112.

## INVESTIGATION OF THE PINE CONES MICROWAVE HEATING PROCESS TO EXTRACT HIGH QUALITY SEEDS FROM THEM

*A.Z. Petrova, G.A. Morozov, I.T. Shakirov*

Kazan National Research Technical University A.N. Tupolev-KAI  
10, st. K. Marx, 420111, Kazan, Russian Federation

**Abstract:** The purpose of the study is to evaluate the effect of microwave irradiation of pine cones on the quality of the seeds obtained. The cones were exposed to microwave radiation produced by a generator with a power of 700-800 W. The study was carried out in several modes, in which the duration of microwave irradiation was a variable parameter. The temperature distribution on the surface and inside the cones was determined using the special termometr. The energy (viability) and germination (quality class) of seeds treated with microwave radiation were also evaluated. The results of the research made it possible to state that with the accepted process parameters, it is possible to obtain seeds of the second quality class after exposure to microwaves for 6 s. With an increase in irradiation time over 6 s, the viability of the seeds decreased, and their quality was unsatisfactory.

**Keywords:** pine; seeds; electromagnetic radiation; temperature; seed quality class; germination.

Статья представлена в редакцию 27 декабря 2022г.