


Е.С. Ритгер, А.А. Савостин, Д.В. Ритгер , С.С. Молдахметов, П.А. Петров
Kozybayev University, Петропавловск, Казахстан
E-mail: dritter@ku.edu.kz

ПОВЫШЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В МИКРОВОЛНОВЫХ ЗЕРНОСУШИЛКАХ

Аннотация. В статье рассмотрена возможность более эффективного использования микроволнового излучения. Обоснованы технологические преимущества микроволновой сушки зерна по сравнению с другими традиционными способами.

Представлены конструкции и способы реализации переизлучающих цилиндрических вибраторов. Предложен новый метод регулировки мощности переменного электромагнитного поля элементами антенной решетки.

В работе описаны результаты практических экспериментов по оценке переизлучающей способности цилиндрических вибраторов, образующих в совокупности с проводом волновода, коллинеарную антенную решетку.

В соответствии с проведенными исследованиями, предложена схема вибраторной антенной решетки и подробно описаны ее функциональные узлы. Предложенная конструкция антенной решетки позволяет ее размещение на фокальной оси эллиптического рефлектора с целью обеспечения более эффективной защиты от вредоносного микроволнового излучения.

В статье показано, как с помощью переизлучающей антенной решетки достигается равномерное распределение энергии переменного электромагнитного поля по длине облучаемого объекта.

Работа преследует практические цели и направлена на повышение эффективности микроволновых сушильных установок за счет совершенствования их конструкций.

Ключевые слова. Распределение поля, волновод, вибратор, антенная решетка, микроволновое облучение.

Введение.

Различные технологии сушки позволяют сохранять высокое качество зерна в течение длительного времени, не портя его, чтобы всегда обеспечивать людей этим ценным пищевым ресурсом. Сушка является наиболее важным фактором для обеспечения устойчивого состояния зерна при хранении.

В технологии сушки зерновых материалов в основном используются два метода удаления влаги из зерна.

Первый метод осуществляется за счет контакта влажного зерна с гигроскопичным материалом позволяющим извлекать влагу из зернового материала, путем сорбции. Реализация данного метода осуществляется путем смешивания сухого зерна с более влажным или использованием другого гранулированного материала.

Второй метод основан на использовании тепловой энергии для превращения влаги в пар.

Проведенный анализ развития технологии зерносушения показывает, что современная промышленная сушка зерна, как и в прошлом, в основном базируется на тепловом способе. В настоящее время известны различные приемы и методы тепловой сушки зернового материала: конвективный способ сушки, контактная сушка,

инфракрасный способ сушки, радиационный способ сушки, сушка токами высоких и сверхвысоких частот [1-3].

Сушка на основе воздействия электромагнитного излучения сверхвысокой частоты (микроволновая сушка) является одним из перспективных способов обезвоживания растительного сырья. Микроволновая сушка имеет существенное преимущество перед своими аналогами, в данном способе отсутствует передача тепла от нагревательного элемента. В то же время, при использовании конвективной сушки, необходимо сначала нагреть теплоноситель – воздух с помощью каких-либо нагревателей, а затем передать тепло от нагретого воздуха продукту. При этом на каждом из этапов: нагрев воздуха, его перемещение, передача тепла от нагретого воздуха продукту сушки, происходят неизбежные потери тепла, что приводит, в общем, к снижению КПД установки на 60-65%. В процессе микроволновой сушки сам продукт является источником тепла, следовательно, вся энергия, поступающая от магнетрона, поглощается продуктом сушки, поэтому указанные ранее потери отсутствуют. Следовательно, коэффициент полезного действия микроволновых установок составляет 85-90%. [4].

Не смотря на перечисленные выше преимущества микроволновой сушки зерна, по сравнению с традиционными способами, проведенный анализ показал ряд существенных недостатков конструкций микроволновых сушильных установок, применяемых в настоящее время на зерноперерабатывающих предприятиях (неравномерный нагрев зернового слоя, высокая стоимость сверхвысокочастотных генераторов, неудобность перевозки сушильных камер, большая металлоемкость) [5].

Цель исследования – модернизация микроволновых установок для сушки зерна за счет совершенствования их конструкции в целом или отдельных составных узлов.

Материалы и методы.

Применяемые в настоящее время установки для сверхвысокочастотной сушки зерна характеризуются недостаточно равномерным распределением плотности потока электромагнитной энергии, поступающей от генератора на поверхность зернового материала. Известно, что в традиционных микроволновых сушильных установках для возбуждения электромагнитного поля используются рупорные излучатели, которые установлены вдоль объекта сушки таким образом, чтобы создавать равномерное облучение по всей его длине. Однако равномерность облучения в данном случае оставляет желать лучшего, так как равномерность электромагнитного поля в раскрыве излучателя крайне низкая.

Авторами предлагается решение данной проблемы за счет применения коллинеарной антенной решетки, представляющей собой ряд переизлучающих вибраторов, расположенных по определенному закону вдоль провода поверхностного волновода.

Стоит отметить, что при возбуждении провода поверхностного волновода около него возникает поверхностная волна Е-типа [6]. Для создания равномерного электромагнитного поля по длине облучаемого объекта необходимо в поле поверхностной волны поместить группу вибраторов. Конфигурация вибраторов может быть различной. Возможно применение вибраторов в виде спирали или цилиндров. В роли вибраторов могут быть использованы металлические проводники различной природы, размещенные в электромагнитном поле. Для переизлучения энергии поля был выбран вибратор цилиндрической формы из-за простоты конструкции.

На рисунке 1 показан общий вид цилиндрического вибратора.

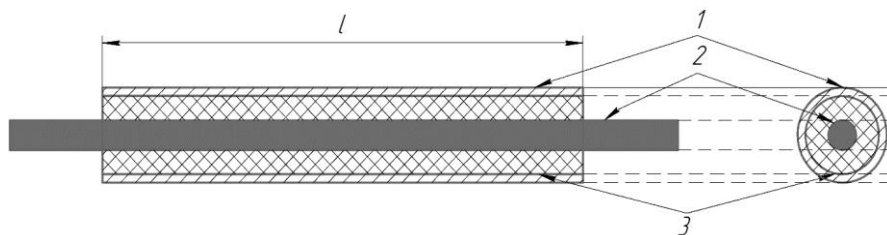


Рисунок 1 – Общий вид переизлучающего вибратора

Переизлучающий вибратор состоит из металлического цилиндра 1 и диэлектрической вставки 2, в качестве провода волновода 3 использовалась дюралюминиевая трубка диаметром 4 мм, а в качестве вибратора использовался отрезок коаксиального кабеля РК-150-8-11 длиной l .

Группа подобных переизлучающих вибраторов, установленных вдоль провода волновода, образуют переизлучающую антенную решетку. На рисунке 2 показан провод, на котором установлены переизлучающие вибраторы в виде соосных с проводом трубчатых отрезков, соизмеримых с длиной волны.

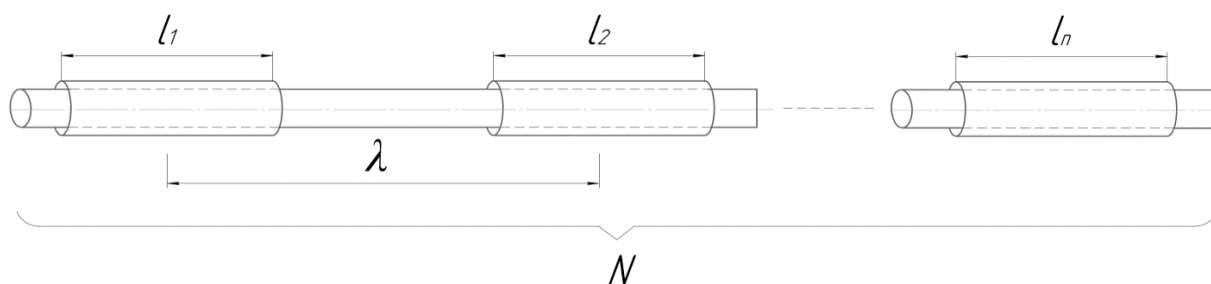


Рисунок 2 – Схема размещения переизлучающих вибраторов на проводе волновода

Равномерное переизлучение мощности магнетронного генератора антенной решеткой достигается за счет излучения каждым ее элементом мощности, определяемой законом амплитудно-фазового распределения поля.

При разработке переизлучающей антенной решетки на основе свойств поверхностного волновода необходимо учитывать следующее: энергия электромагнитного поля, возбуждаемой в волноводе трансформируется в энергию, излучаемую каждым вибратором. Таким образом, если на первый переизлучающий вибратор подается мощность P , то на второй переизлучающий вибратор подается мощность, определяемая выражением (1).

$$P_2 = P - P_1, \quad (1)$$

где P – мощность, подаваемая на первый переизлучающий вибратор,

P_1 – мощность переизлучаемая первым вибратором,

P_2 – мощность, подаваемая на второй вибратор.

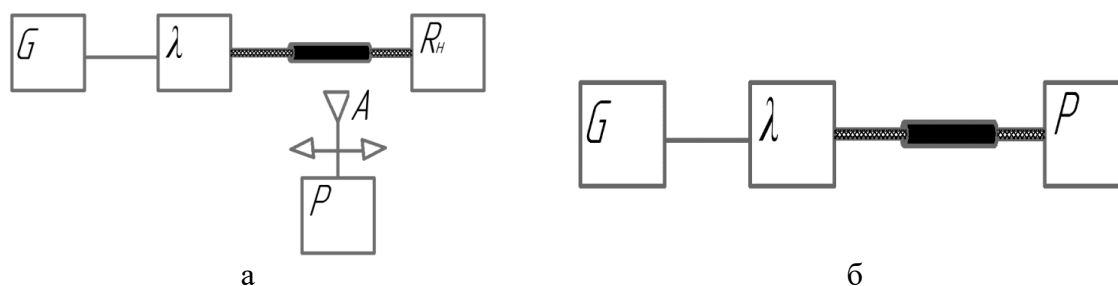
Данный процесс будет повторяться для всех вибраторов антенной решетки, т.е. каждому следующему вибратору подается меньше мощности, чем впереди стоящему.

Таким образом, для обеспечения равномерного распространения энергии электромагнитного поля по длине переизлучающей решетки необходимо обеспечить требуемые коэффициенты связи для каждого переизлучающего вибратора с проводом [7]. Значение коэффициента связи можно регулировать путем изменения параметров переизлучающего вибратора.

Результаты и обсуждение.

Оценка переизлучаемой способности цилиндрическим вибратором энергии электромагнитного поля была проведена двумя способами. В первом способе на проводе волновода размещался одиночный цилиндрический вибратор, на фиксированном расстоянии s от провода волновода устанавливалась рупорная антенна A . Изменяя длину вибратора, оценивалась мощность, принимаемая рупорной антенной. Общая схема установки приведена на рисунке 3а.

Другой способ сводится к передаче сигнала от источника G через однопроводную линию на приемное устройство P , при этом регистрируются значения подводимой от источника мощности в зависимости от длины переизлучающего вибратора. Общая схема установки приведена на рисунке 3б.



G – генератор, λ – волномер, R_n – Нагрузка, A – рупорная антенна, P – приемник

Рисунок 3 – Блок-схема экспериментальной установки

Проведенные эксперименты показали схожие результаты. Следовательно, фиксируя мощность, переизлучаемую вибраторами, можно оценить равномерность переизлучения мощности антенной решеткой в целом.

На рисунке 4 представлены результаты экспериментов в виде графиков.

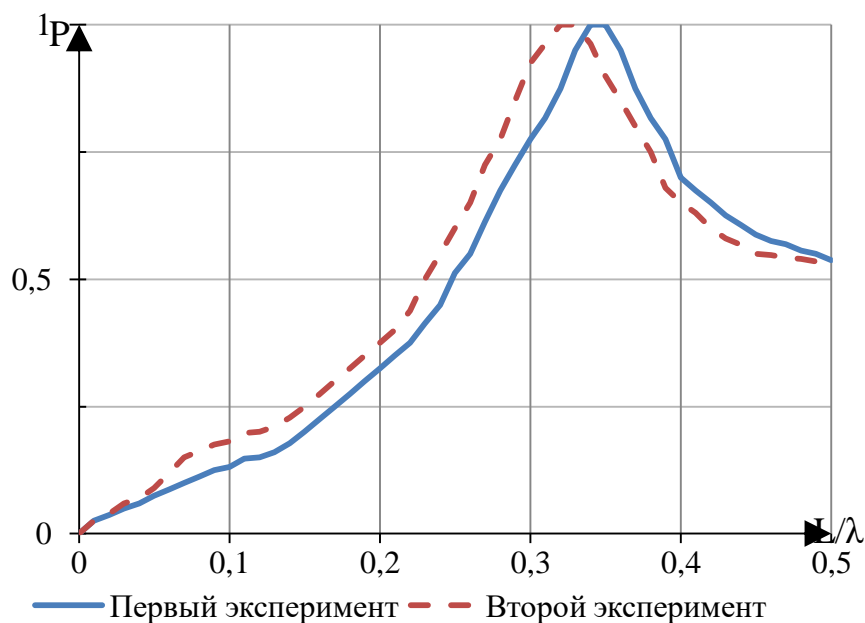


Рисунок 4 – Результаты экспериментов

Проведенные исследования показали, что чем короче вибратор и больше его радиус, тем меньше его коэффициент связи с проводом. Изменение длины

переизлучающего вибратора является наиболее удобным способом для достижения требуемых значений коэффициента связи. В результате проведенных экспериментов было выяснено, что максимальной длины вибратор должен располагаться в конце антенной решётки, а минимальной длины в ее начале.

Далее для выполнения исследований была сконструирована переизлучающая антенная решетка из восемнадцати цилиндрических вибраторов на базе поверхностного волновода с рабочей частотой 0,915 ГГц. Фрагмент антенной решетки изображён на рисунке 5.



Рисунок 5 – Фрагмент антенной решетки

Эксперимент проводился в следующей последовательности: на линии передачи размещался цилиндрический вибратор длиной l , далее уменьшалась длина вибратора до того момента, пока вибратор не начинал переизлучать 5% подводимой к линии мощности (первый переизлучающий вибратор). Значение 5% выбирается исходя из следующих требований: для обеспечения равномерного распределения энергии поля вдоль антенной решетки, состоящей из N -го количества вибраторов. Причем N -й вибратор должен переизлучать в окружающую среду максимальную долю оставшейся мощности в проводе поверхностного волновода, а оставшаяся мощность P_{ost} должна поглощаться согласующей нагрузкой. На мощность, поглощаемую нагрузкой, отводилось примерно 5% от общей мощности, подаваемой от СВЧ генератора. Вычисление переизлучаемой мощности каждым вибратором δ , производилось по формуле (2).

$$\delta = \frac{(1 - \frac{P_{ost}}{P})}{N}, \quad (2)$$

δ – переизлучаемая мощности каждым вибратором;

P_{ost} – остаточная мощность;

P – мощность, поступающая от генератора;

N – количество вибраторов в антенной решетке.

Далее определялась длина второго переизлучающего вибратора, при которой он бы переизлучал в открытое пространство 5% от общей мощности P , поступающей от СВЧ генератора в линию передачи. При выполнении данного эксперимента были проделаны оценки для всех элементов антенной решетки. Результаты эксперимента указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Значение длины l при которой переизлучаемые мощности вибраторов равны

№ переизлучающего вибратора	Длина переизлучающего вибратора l
1	0,28 λ
2	0,282 λ
3	0,286 λ

4	0,289 λ
5	0,29 λ
6	0,294 λ
7	0,299 λ
8	0,302 λ
9	0,305 λ
10	0,308 λ
11	0,311 λ
12	0,315 λ
13	0,318 λ
14	0,391 λ
15	0,396 λ
16	0,402 λ
17	0,409 λ
18	0,417 λ

Кроме варианта выполнения переизлучающего вибратора в виде цилиндра, существуют и другие, например, в виде спирали, обвитой вокруг провода. Коэффициент связи вибратора с проводом в этом случае регулируется количеством витков. Вариантов конструкций переизлучающих антенных решеток тоже может быть несколько, например, размещая вибраторы около провода, а не соосно с ним. Коэффициент связи в данном случае определяется не только параметрами вибратора, но и его расстоянием от провода. Исследования показали, что для обоих вариантов, когда вибраторы соосны с проводом и когда расположены около провода, степень фокусировки излучения одинакова. Эксперименты с восемнадцатиеlementной антенной решеткой для варианта, когда вибраторы расположены соосно с проводом показывают, что в Е-плоскости на уровне -12 дБ ширина диаграмм направленности составляет 21°.

Таким образом, способ равномерного распределения мощности от СВЧ генератора вдоль всей антенной решетки понятен. Сущность данного способа состоит в равномерном переизлучении энергии электромагнитного поля каждым вибратором, входящим в общую конструкцию антенной решетки. Совокупность переизлучаемых каждым вибратором полей формирует цилиндрическую волну, расходящуюся во все стороны. В этой связи представляется возможность повышения равномерности распределения энергии электромагнитного поля на зерновой материал, расположенного на конвейерной ленте.

В результате выполнения экспериментов с переизлучающей вибраторной антенной решеткой были получены следующие результаты:

- 1) Неравномерность электромагнитного поля, создаваемого поверхностным волноводом без переизлучающих вибраторов, составила 27 dB.
- 2) Неравномерность электромагнитного поля, при размещении одного переизлучающего вибратора на проводе волновода, составила 23 dB.
- 3) Неравномерность электромагнитного поля, при размещении десяти переизлучающих вибраторов на проводе волновода, составила 9 dB.
- 4) Неравномерность электромагнитного поля, при размещении восемнадцати переизлучающих вибраторов на проводе волновода, составила 2 dB.
- 5) Установлено, что при использовании провода с диэлектрическим покрытием уровень распространения электромагнитного поля около волновода в несколько раз выше, чем при использовании провода без покрытия;
- 6) Установлено, что при увеличении частоты облучения уровень электромагнитного поля около волновода уменьшается.

Заключение.

На основе проведенных исследований появилась возможность реализации инновационных микроволновых сушильных установок:

- с бесконтактной регулировкой уровня переменного электромагнитного поля;
- с минимальной металлоемкостью за счет применения компактной переизлучающей антенной решетки, а не целого ряда громоздких рупорных излучателей;
- с более эффективной защитой от вредоносного микроволнового излучения за счет использования эллиптического отражателя в совокупности с переизлучающей антенной решеткой, размещенной на его фокальной оси;
- с возможностью концентрации электромагнитного излучения по длине конвейерной ленты.

Полученные результаты исследований могут быть использованы не только для реализации микроволновых зерновых сушилок, но и для проектирования сверхвысокочастотных установок, используемых на деревообрабатывающих предприятиях, в сельском хозяйстве, в промышленности и в ряде других производств.

Финансирование. Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP13268797).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] V. Palamarchuk, S. Gyrych, O. Vasilishina, O. Pahomska ‘Intensification of the flow process of grain drying using two-sided infrared irradiation’ *Technology audit and production reserves*, vol. 57, no. 1, February 2021, pp 34-37. DOI: 10.15587/2706-5448.2021.225528.
- [2] H. Jafari, D. Kalantari, M. Azadbakht ‘Energy consumption and qualitative evaluation of a continuous band microwave dryer for rice paddy drying’, *Energy*, vol. 142, Januar 2018, pp 647-654. DOI: 10.1016/j.energy.2017.10.065.
- [3] R.Q. De Faria, A.R.P. Dos Santos, Y. Gariepy, E.A.A. Da Silva, M.M.P. Sartori, V. Raghavan ‘Optimization of the process of drying of corn seeds with the use of microwaves’, *Drying Technology*, vol. 38, no. 5, November 2019, pp 676-684. DOI: 10.1080/07373937.2019.1686009.
- [4] I. L. Boshkova, N. V. Volgusheva and L. Z. Boshkov ‘Analytical study of temperature field during microwave drying of the material’, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1683, 22044. DOI:10.1088/1742-6596/1683/2/022044.
- [5] I. Boshkova, N. Volgusheva, A. Titlov, S. Titar and L. Boshkov, ‘Assessment of efficiency of drying grain materials using microwave heating’, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1/8 (97) 2019, pp 78-86. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154527.
- [6] J. Cieslik, D. Ritter, V. Kismereshkin, E. Ritter, A. Savostin, N. Nabiyeu, ‘Installation for concentrated uniform heating of objects by microwave radiation’, *International Journal of Electronics and Telecommunications*. vol. 66, no 2. May 2020. PP. 295-300. DOI: 10.24425/ijet.2020.131877.
- [7] E. Ritter, V. Kismereshkin, J. Cieslik, A. Savostin, D. Ritter, A. Aytulina, I. Kasimov, B. Bekkozhdina. ‘Uniform large-sized lumber drying system using mw radiation and basing on a single-wire E₀₀ wave energy transmission line’, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4, no 8 (106), August 2020, pp. 295-300. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210752.

Екатерина Риттер, PhD доцент, Kozybayev University, Петропавл, Қазақстан, esritter@ku.edu.kz

Алексей Савостин, т.ғ.к., профессор, Kozybayev University, Петропавл, Қазақстан, asavostin@ku.edu.kz

Дмитрий Риттер, т.ғ.к., профессор, Kozybayev University, Петропавл, Қазақстан, dritter@ku.edu.kz

Саят Молдахметов, PhD, доцент, Kozybayev University, Петропавл, Қазақстан, ssmoldahmetov@ku.edu.kz

Павел Петров, PhD, доцент, Kozybayev University, Петропавл, Қазақстан, papetrov@ku.edu.kz

МИКРОТОЛҚЫНДЫ АСТЫҚ КЕПТІРГІШТЕРДЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТТІК ӨРІСТІҢ БІРКЕЛКІ ТАРАЛУЫН АРТТЫРУ

Андатпа. Мақалада микротолқынды сәулеленуді тиімді пайдалану мүмкіндігі қарастырылған. Астықты микротолқынды кептірудің басқа дәстүрлі әдістермен салыстырғанда анықталған технологиялық артықшылықтары негізделген.

Қайта шығарылатын цилиндрлік вибраторлардың конструкциялары мен тәсілдері ұсынылған. Айнымалы электромагниттік өрістің қуатын антенна торының элементтерімен реттеудің жаңа әдісі ұсынылды.

Жұмыста толқын өткізгіштің сымымен бірге коллинеарлы антенна торын құрайтын цилиндрлік вибраторлардың қайта сәулелену қабілетін бағалау бойынша практикалық эксперименттердің нәтижелері сипатталған.

Жүргізілген зерттеулерге сәйкес вибраторлық антенна торының схемасы ұсынылған және оның функционалды түйіндері егжей-тегжейлі сипатталған. Ұсынылған антенна торының дизайны зиянды микротолқынды сәулеленуден тиімді қорғауды қамтамасыз ету үшін оны эллиптикалық рефлектордың фокустық осіне орналастыруға мүмкіндік береді.

Мақалада айнымалы электромагниттік өріс энергиясының сәулеленген объектінің ұзындығы бойынша біркелкі таралуына қайта сәулелендіретін антенна торының көмегімен қалай қол жеткізілетіні көрсетілген.

Жұмыс практикалық мақсаттарды көздейді және олардың конструкцияларын жетілдіру арқылы микротолқынды кептіру қондырғыларының тиімділігін арттыруға бағытталған.

Түйінді сөздер. Өрістің таралуы, толқын өткізгіш, вибратор, антенна торы, микротолқынды сәулелену.

Ekaterina Ritter, PhD, docent, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan, esritter@ku.edu.kz

Alexey Savostin, candidate of technical sciences, professor, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan, asavostin@ku.edu.kz

Dmitry Ritter, candidate of technical sciences, professor, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan, dritter@ku.edu.kz

Sayat Moldakhmetov, PhD, docent, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan, ssmoldahmetov@ku.edu.kz

Pavel Petrov, PhD, docent, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan, papetrov@ku.edu.kz

INCREASING THE UNIFORM DISTRIBUTION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN MICROWAVE GRAIN DRYERS

Annotation. The article considers the possibility of more efficient use of microwave radiation. The technological advantages of microwave grain drying in comparison with other traditional methods are substantiated.

Designs and methods of realization of re-emitting cylindrical vibrators are presented. A new method of adjusting the power of an alternating electromagnetic field by elements of an antenna array is proposed.

The paper describes the results of practical experiments to evaluate the re-emitting ability of cylindrical vibrators forming a collinear antenna array in conjunction with the waveguide wire.

In accordance with the conducted research, a scheme of a vibratory antenna array is proposed and its functional nodes are described in detail. The proposed design of the antenna array allows its placement on the focal axis of the elliptical reflector in order to provide more effective protection against harmful microwave radiation.

The article shows how, with the help of a re-emitting antenna array, a uniform distribution of the energy of an alternating electromagnetic field along the length of the irradiated object is achieved.

The work pursues practical goals and is aimed at improving the efficiency of microwave drying plants by improving their designs.

Keywords. Field distribution, waveguide, vibrator, antenna array, microwave irradiation.
