

Разработка камерного дефростера с СВЧ-мощностью 12 кВт

А.О. Морозов¹, И.В. Лушников¹, А.В. Прокопенко²

¹АО «НПП «Магратеп»

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

Аннотация: в работе показана необходимость создания микроволновых дефростеров камерного типа производительностью до 400 кг/час. Представлены результаты разработки отечественного камерного дефростера с СВЧ-мощностью до 12 кВт. Прямоугольная рабочая камера дефростера объемом более 1300 литров работает в многомодовом режиме с антенными узлами СВЧ-мощности. Установка питается от четырех магнетронов М-176 СВЧ-мощностью до 3 кВт на частоте 915 МГц. Приведены результаты разработки антенных узлов ввода СВЧ-мощности, расположенных на верхней стенке камеры и на задней стенке под вращающимся загрузочным столом. Приведено сравнение работы различных узлов вводов мощности с целью оптимизации их работы и улучшения равномерности размораживания. Улучшена эргономика загрузки мясных и рыбных блоков. Представлены результаты работы дефростера в условиях пищевого промышленного производства, показавшие, что эксплуатационные характеристики разработанной установки соответствуют параметрам зарубежных камерных дефростеров.

Ключевые слова: дефростер, размораживание, магнетрон, мощность, камера, антенный узел, ввод, равномерность, эргономика

1. Введение

Более двадцати пяти лет назад микроволновая дефростация пищевого сырья начала активно внедряться в пищевое производство в России. Пищевая промышленность ежегодно перерабатывает миллионы тонн замороженной мясной и рыбной продукции. Микроволновая дефростация характеризуется существенной скоростью процесса, отсутствием потерь внутренней жидкости и повышенной микробиологической безопасностью в отличие от традиционных методов разморозки продукта [1]. Качество микроволнового размораживания зависит от правильно подобранных режимов дефростации продукта. Как правило, для мясной и рыбной продукции, с целью исключения процессов существенного неоднородного перегрева, осуществляется отепление до средней температуры -1°C – -2°C , приводящее к разрушению монолитной структуры льда. В настоящее время микроволновая дефростация применяется как на крупных, так и на небольших перерабатывающих предприятиях.

До 2014 года в России на рынок пищевого оборудования продвигались зарубежные промышленные камерные и туннельные дефростеры с производительностью по размораживанию мясного продукта – от 1 т/час до 5 т/час. Такие установки с СВЧ-мощностью от 50 до 300 кВт на частоте 915 МГц поставлялись зарубежными компаниями Saigem (Франция) и AMTek (США) и устанавливались на крупных перерабатывающих предприятиях. В настоящее время потребность в новых туннельных дефростерах низкая, а имеющееся оборудование продолжает обслуживаться и постепенно переводиться на отечественные магнетроны марки М-177, которые в настоящее время выпускаются компанией АО «НПП «Магратеп».

В последнее десятилетие у отечественных и зарубежных производителей появляется линейка микроволновых дефростеров камерного типа мощностью от 10

кВт с загрузкой до 2х крафтовых коробок продукта с производительностью до 400 кг/час. Это оборудование востребовано на малых пищевых предприятиях, где суточная потребность в различных размороженных продуктах не превышает двух тонн, а также на холодильных складских комплексах для быстрой оценки качества принимаемой продукции [2]. Разработкой таких дефростеров с 2018 года в России занимается АО «НПП «Магратеп».

2. Микроволновый дефростер камерного типа

В 2018 году в АО «НПП «Магратеп» разработан и выпущен серийный микроволновый дефростер камерного типа ДМК-10, предназначенный для размораживания мясных или рыбных блоков с разовой загрузкой 25 - 50 кг [3]. Дефростер работает на трех магнетронах с СВЧ-мощностью до 3 кВт на частоте 915 ± 10 МГц. В установке используется магнетрон марки М-176 с оксидным катодом [4], который компания производит с 2015 г. Для магнетрона разработан трехфазный источник высоковольтного питания трансформаторного типа, позволяющий ему работать в режиме 1 кВт, 2 кВт и 3 кВт СВЧ-мощности. Магнетрон пакетированной конструкции на постоянных магнитах имеет массу 3 кг, охлаждается водой и может кратковременно работать с КСВН до 1,8. Для повышения электромагнитной безопасности в корпус прибора внедрен фильтр внетрактового излучения из катодной ножки магнетрона. Штыревая антенна магнетрона устанавливается в согласованный коаксиально-волноводный переход на прямоугольный волновод сечением 195 мм на 30 мм. Характеристики прибора представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики магнетрона М-176

Режим работы источника	Анодный ток, мА	Анодное напряжение, кВ	КПД, %	КСВН	Генерируемая мощность, кВт
1 кВт	350	4,2	81	1,2	1,2
2 кВт	640	4,2	81	1,2	2,3
3 кВт	920	4,2	82	1,2	3,2

Установка ДМК-10 работает на 3-х уровнях СВЧ-мощности 3 кВт, 6 кВт и 9кВт. Объем прямоугольной рабочей камеры дефростера составляет чуть более 1300 литров. Для увеличения равномерности дефростации в рабочей камере размещается вращающийся стол, который вмещает до двух замороженных блоков. Удобство ДМК-10 состоит в том, что он предназначен для работы в закрытых помещениях с различным температурным режимом и имеет замкнутую жидкостную систему охлаждения магнетронов. Дефростер требует только подключения к трехфазной электрической сети, от которой он потребляет мощность в 13 кВт. Возможность установки дефростера в холодных помещениях является одним из преимуществ его эксплуатации.

Серийный образец дефростера ДМК-10 является аналогом зарубежного камерного дефростера AMW200 Dual фирмы Sairem (Франция), который использует два магнетронных генератора СВЧ-мощностью 5 кВт каждый на частоте 915 МГц [2]. Стоимость разработанного дефростера ДМК-10 в разы меньше зарубежных аналогов. В ходе опытной эксплуатации установка была успешно апробирована на восьми предприятиях пищевой отрасли, в том числе на малых производствах и фабриках-кухнях, при проведении процессов дефростации сливочного масла, а также рыбных и мясных блоков. Производительность данного дефростера зависит от загружаемого объема, вида и качества размораживаемого продукта. Наибольшая производительность при размораживании от температуры -18 °С до температуры -2 °С – -1 °С по сливочному маслу достигает до 300 кг/час. При дефростации блоков трески

в режиме полной мощности производительность ДМК-10 составила порядка 150 кг/час. В зависимости от массы и вида продукта на панели приборов задается уровень мощности и время воздействия. По результатам опытной эксплуатации дефростеров появилась необходимость введения доработок, которые носят технический, эксплуатационный и эргономический характер. Основное замечание относилось к необходимости поднятия производительности путем увеличения СВЧ-мощности установки.

Учитывая выявленные замечания, была выполнена модернизация камерного дефростера на СВЧ-мощность до 12 кВт. В модернизированных дефростерах увеличено количество магнетронных генераторов до четырёх, изменены верхние узлы ввода СВЧ-мощности, выполнены конструкторские изменения компоновки и улучшена эргономика загрузки мясных и рыбных блоков. Модернизированный серийный образец дефростера «ДМК-10» представлен на рисунке 1



Рисунок 1. Модернизированный микроволновый дефростер «ДМК-10».

Конструктивные изменения при модернизации состояли в переносе высоковольтных источников анодного питания магнетронов в отдельный отсек и размещение его под рабочей камерой, что позволило повысить электробезопасность и понизить центр тяжести устройства. Изменения также коснулись загрузочного узла рабочей камеры. Без изменения габаритных размеров рабочей камеры расширен проем для вращающегося загрузочного стола, на который помещаются один или два стандартных мясных или рыбных блока размером 600мм×400мм×200мм, и организована роликовая система перемещения стола из рабочей камеры на приставной стол, что позволило упростить и ускорить операцию загрузки дефростера в 4 раза. Также с использованием электропривода механизирована загрузочная дверца дефростера и для удобства пульт управления вынесен на уровень загрузочного стола. Данные изменения существенно улучшили эргономику устройства, что позволило достичь удобства эксплуатации, сопоставимого с импортными аналогами.

В прямоугольной рабочей камере микроволнового дефростера, работающей в многомодовом режиме, на расстоянии в 1/3 от высоты камеры размещался вращающийся стол, вмещающий до двух замороженных блоков общим весом до 80 кг. Вводы СВЧ-мощности магнетронов разнесены по стенкам рабочей камеры. Для

увеличения равномерности дефростации в рабочей камере на верхней стенке размещаются два угловых вывода СВЧ-мощности. Диаграммы направленности этих антенн обращены к центру поворотного стола. На верхнюю стенку камеры установлен отражающий элемент, позволяющий уменьшить влияние верхних антенн друг на друга. Третий и четвертый магнетоны с рупорными вводами СВЧ-мощности располагаются на задней стенке ниже уровня вращающегося стола. Такое расположение антенн после оптимизации их размещения позволяет получить достаточно равномерный нагрев ледяных блоков.

Модернизированная установка работает на 3-х уровнях СВЧ-мощности: 4 кВт, 8 кВт и 12 кВт. Магнетроны марки М-176, работают на частотах от 905 МГц до 920 МГц. Дефростер имеет замкнутую жидкостную систему охлаждения магнетронов, расположенную в нижней части корпуса. Максимальная потребляемая электрическая мощность модернизированного дефростера составляет 18 кВт.

На первых моделях дефростеров на верхней стенке рабочей камеры использовались угловые выходы мощности, настраиваемые центральным штырем [3], которые позволяли получить значение КСВН в рабочей камере не более 1,6 при вращении стола с ледяными блоками объемом в 40 литров. Эскиз этой штыревой антенны изображен на рисунке 2.а. Опыт эксплуатации дефростера показал, что при длительном использовании установки в области перехода на штырь диаметром 16 мм происходит нагрев до 95 °С за счет контактного омического сопротивления. Для устранения этого недостатка разработан новый верхний узел ввода СВЧ-мощности в виде углового ввода с лепестком, изображенным на рисунке 2.б. Диаграмма направленности такой антенны обращена вниз в сторону от магнетрона. Характеристики антенны зависят от раскрытия, а также от длины и ширины лепестка. Для подстройки антенны на рабочую камеру лепесток возможно подгибать в сторону волновода. Такая конструкция антенны позволяет получить КСВН менее 1,1 на свободное пространство и избежать контактного омического сопротивления при подстройке [5]. Нижние вводы СВЧ-мощности выполнены на основе перехода от прямоугольного волновода сечением 195 мм на 30 мм в виде рупора с несимметричным раскрытием в плоскости Е (см. рисунок 2.в). Расстояние между вводами выбиралось так чтобы обеспечить минимальный коэффициент переходного ослабления между ними, а настройка на минимальное значение КСВН выполнялась путем изменения геометрии рупора.

Исследования и настройка всех антенн на низком уровне мощности выполнялись с использованием оснастки, имитирующей штыревые антенны магнетрона марки М-176, с помощью портативного векторного анализатора цепей R&S@ZNH4. Настройка антенн осуществлялась при вращении стола, заполненного ледяными блоками объемом 40 л. Для большей равномерности разморозки продукта две верхние антенны размещали сонаправлено над столом дефростера. Раскрытия антенн перекрывались фторопластовыми пластинами, предотвращающими попадание продуктов размораживания и пыли в волновод. Измерения показывают, что в заданном диапазоне частот значение КСВН на антеннах не превышало 1,5. Для уменьшения влияния верхних антенн друг на друга, на верхнюю стенку камеры устанавливался отражающий элемент с высотой ребра 160 мм, что позволило достичь коэффициента переходного ослабления между антеннами более -15 дБ. Проведенные измерения для рупорных антенн показали, что их КСВН не превышал 1,3, а коэффициент переходного ослабления с верхними антеннами был ниже -15 дБ. Влияние верхних и нижних антенн оказалось еще менее значительным. Чтобы еще больше уменьшить связь между антеннами в дефростере использовались магнетроны с разнесенными частотами.

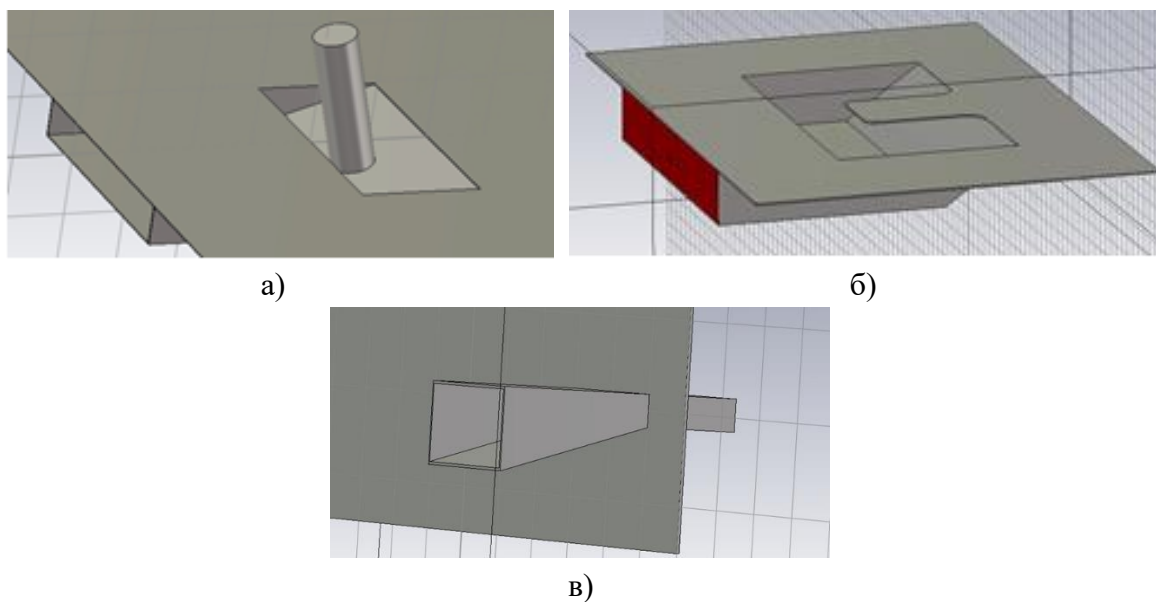


Рисунок 2. Антенны ввода СВЧ-мощности в рабочую камеру дефростера: а – угловой ввод со встроенным штырем; б – угловой ввод с лепестком; в – несимметричная рупорная антенна с раскрывом в плоскости Е.

Эксплуатация дефростеров ДМК-10 с СВЧ-мощностью 12 кВт на различных сортах мяса, рыбы и морепродуктов показала, что они по эксплуатационным характеристикам не уступают зарубежным аналогам. В дальнейшем планируется модернизировать систему управления режимами работы с использованием промышленных микроконтроллеров.

3. Заключение

В АО «НПП «Магратеп» разработан промышленный дефростер камерного типа с СВЧ-мощностью 12 кВт с использованием многомодовой рабочей камеры и четырех магнетронов марки М-176, работающих на частотах от 905 МГц до 920 МГц. Проведенные экспериментальные изучения электродинамических характеристик камеры дефростера подтверждают её работоспособность. Промышленная эксплуатация модернизированного микроволнового дефростера позволила разработать режимы разморозки мясных брикетов, рыбных блоков и сливочного масла в условиях пищевых производств.

Список литературы

1. Часовикова Н. Это требование времени: процесс дефростации должен быть современным // Мясная сфера. 2012. №6, С. 60-61.
2. Лукашова Т.А. Разработка технологии безградиентного размораживания творога для дальнейшей промышленной переработки. Автореф. дис. канд. техн. наук. 05.18.04 - Москва: ФГБНУ «ВНИМИ» 2015. 25с
3. O. Morozov, A. Morozov and A. Prokopenko, "Research and Development of Chamber Type Industrial Microwave Defroster," 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), Saratov, Russia, 2020, pp. 332-334, doi: 10.1109/APEDE48864.2020.9255524.
4. Каргин А. Н., Морозов О. А., Морозов А.О., Савенко Г. П., Симоненко А. Н., Федотов В. В. Электронная оптика современных магнетронов. // Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника. 2015. № 3(526), С. 27–35.
5. O. Morozov, A. Morozov and A. Prokopenko, "Development and Modernization of Chamber Type Defroster with Microwave Power up to 12 kW," 2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), Saratov, Russian Federation, 2022, pp. 218-220, doi: 10.1109/APEDE53724.2022.9912815.