ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2495
https://elibrary.ru/RFEYTQ

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Параметры модульных микроволновых вакуум выпарных установок

А. В. Гаврилов*, Ю. Б. Гербер

Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, Симферополь, Россия

Поступила в редакцию: 14.03.2023
Принята после рецензирования: 06.06.2023
Принята к публикации: 04.07.2023

**А. В. Гаврилов: tehfac@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3382-0307*
Ю. Б. Гербер: https://orcid.org/0000-0003-3224-6833

© А. В. Гаврилов, Ю. Б. Гербер, 2024

Аннотация.
Применение микроволнового подвода энергии в процессе выпаривания позволяет получить продукты с более высокими концентрациями сухих веществ и более высокого качества по сравнению с другими методами концентрирования и традиционными выпарными аппаратами. Несмотря на эффективность процесса микроволнового выпаривания, отсутствуют методы проектирования промышленных установок для его реализации. Цель исследования заключалась в определении конструктивных и режимных параметров рабочего модуля микроволновой вакуум-выпарной установки.
Для концентрирования соков предложили использовать микроволновую вакуум-выпарную установку (МВВУ) модульного типа с модулями цилиндрической формы. В основе расчета высоты жидкой фазы МВВУ лежит учет динамики образования и роста паровых пузырьков во всем объеме жидкой фазы. Высота паровой зоны модуля определяется из учета обеспечения минимального объема парового сепаратора.
При рабочем давлении в модуле 7,4 кПа минимальный радиус парового пузырька составил $5{,}6\times10^{-5}$ м. На высоте 42 мм над уровнем зарождения паровых пузырьков наблюдалось 100 % паросодержание. Усредненная суммарная высота уровня жидкой фазы над излучателем составила 26 мм, что превышает глубину проникновения излучения в жидкость. Выполненные исследования легли в основу алгоритма расчета конструктивных и режимных параметров рабочего модуля МВВУ и разработанного типоразмерного ряда модулей с мощностями излучателей от 600 то 3000 Вт. Для модулей диаметром 150 мм высота паровой зоны составила 43–80 мм, высота переходной парожидкостной зоны – 9–16 мм. Высота зоны кипения лежит в пределах 45–60 мм.
Предложенные методики позволяют проектировать модульные МВВУ заданной производительности с использованием всего диапазона мощностей промышленно выпускаемых излучателей с воздушным охлаждением. Однако целесообразно использовать модули мощностью до 1100 Вт на финальной стадии процесса концентрирования продуктов до концентраций 60–80 % и более.

Ключевые слова. СВЧ-поле, паросодержание, кипение, сок, концентрат, металлоемкость, перегрев, парообразование, сепарация

Финансирование. Работа выполнена на базе Института «Агротехнологическая академия» Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского (КФУ им. В. И. Вернадского) в рамках госбюджетной темы.

Для цитирования: Гаврилов А. В., Гербер Ю. Б. Параметры модульных микроволновых вакуум выпарных установок // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 1. С. 135–145. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2495

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2495
https://elibrary.ru/RFEYTQ

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Parameters of Modular Microwave Vacuum Evaporators

Alexander V. Gavrilov*, Yuriy B. Gerber

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

Received: 14.03.2023
Revised: 06.06.2023
Accepted: 04.07.2023

**Alexander V. Gavrilov: tehfac@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3382-0307*
Yuriy B. Gerber: https://orcid.org/0000-0003-3224-6833

© A.V. Gavrilov, Yu.B. Gerber, 2024

Abstract.
Microwave energy facilitates evaporation, thus producing more solids of higher quality than other concentration methods and traditional evaporators. Despite its effectiveness, the food industry has no methods for industrial microwave evaporation. This article introduces design and operating parameters for the working module of a novel microwave vacuum evaporation.
The new microwave vacuum evaporator with cylindrical modules was used for juice concentration. The fluid phase level was calculated based on the development and growth of vapor bubbles across the fluid phase volume. The steam phase level depended on the minimal volume of the steam separator.
When the operating pressure in the module was 7.4 kPa, the minimal radius of a vapor bubble was 5.6×10^{-5} m; 100% vapor content was observed 42 mm above the nucleation level of vapor bubbles. The average total height of the fluid phase level above the emitter was 26 mm, which exceeded the level of radiation penetration. The data obtained were used to develop an algorithm that made it possible to calculate the design and operating parameters of the microwave vacuum evaporator, as well as standard size modules with emitter powers of 600–3000 W. The modules with a diameter of 150 mm had the vapor zone at 43–80 mm and the transitional vapor-fluid zone at 9–16 mm. The boiling zone was at 45–60 mm.
The new microwave vacuum evaporator covered the entire power range of industrial air-cooled magnetrons. However, the final stage required modules of ≤ 1100 W for high concentrations of ≥ 60–80%.

Keywords. UHF field, steam content, boiling, juice, concentrate, metal consumption, overheating, vaporization, separation

Funding. The research was conducted on the premises of the Agrotechnological Academy Institute, V.I. Vernadsky Crimean Federal University (Vernadsky CFU) as part of a state assignment.

For citation: Gavrilov AV, Gerber YuB. Parameters of Modular Microwave Vacuum Evaporators. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(1):135–145. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2495

Введение

Фруктовые соки и сиропы обладают антиоксидантными свойствами, а также могут быть использованы для обогащения продуктов витаминами и минеральными веществами [1–3]. Для снижения стоимости хранения и транспортировки соков используется концентрирование путем удаления из них влаги. Несмотря на наличие перспективных технологий обезвоживания продуктов, выпаривание остается одной из распространенных и эффективных технологий концентрирования [4].

Анализ современных технологий выпаривания показал, что в традиционных технологиях (выпаривание с повышением концентрации продукта) снижается интенсивность перемешивания и растет толщина пограничного слоя и его термическое сопротивление. Качество продукта снижается. На практике ограничиваются конечной концентрацией продукта 26–60 % [5]. Эффективность выпаривания можно повысить, используя инновационные технологии адресной доставки энергии. Поэтому целесообразно применять в технологиях выпаривания электромагнитные генераторы энергии микроволнового диапазона.

Сегодня перспективным является использование электромагнитной энергии СВЧ-диапазона для концентрирования растворов с полярным растворителем. Особенностью нагрева продукта в СВЧ-поле является его объемное действие и отсутствие теплопередающей поверхности. При микроволновом воздействии энергия подводится к молекулам воды в продукте, т. к. сухие вещества радиопрозрачны [6]. Очаги парообразования возникают во всем объеме и выполняют функцию греющей поверхности. Таким образом, эквивалентная площадь поверхности теплообмена должна возрастать. Отсутствие требования теплопроводности к стенкам аппарата, в котором концентрируется продукт, стимулирует его применение для концентрирования агрессивных сред. В работах [7, 8] предложено использовать аппараты с микроводновым подводом энергии для концентрирования кислот. Использование микроволнового

нагрева сказывается на интенсификации процессов выпаривания через мембраны [3, 10]. Однако большинство технологий находится на стадии лабораторных исследований, а их крупномасштабное промышленное применение задерживается из-за присущих им проблем. В работе X. Ge предлагается использовать СВЧ-аппарат для непрерывного концентрирования яблочного сока [11]. Микроволновое концентрирование позволило увеличить производительность, коэффициент концентрирования и эффективность, но наблюдалось снижение качества соков из-за резкого возрастания температуры и возникновения локальных зон перегрева [11]. В работах [12, 13] было проведено сравнение концентрирования гранатового сока в условиях вакуума при использовании микроволнового подвода энергии с традиционной технологией концентрирования. Показано, что микроволновой нагрев позволяет получить продукцию более высокого качества за счет сокращения времени проведения процесса. Аналогичные сравнения были проведены при концентрировании яблочного сока [14–16]. Также было отмечено увеличение степени концентрирования и качества полученного концентрата. Улучшение качества продукта при использовании микроволнового выпаривания, по сравнению с традиционными способами, отмечено для сока барбариса, ананаса, черной моркови, вишневого нектара, апельсинового и виноградного соков [13, 16–20]. Для концентрирования поликомпонентных овощных смесей предложена технология двухстадийного вакуум-выпаривания с целью сохранения в них термолабильных веществ [21]. Показанные преимущества позволяют сделать вывод о перспективности использования вакуум-выпарных установок с микроволновым подводом энергии для производства высококачественных концентратов фруктовых и овощных соков, а также концентрирования сахарных и глюкозных сиропов [22–26]. Предложенный способ выпаривания показал свою эффективность для финальной стадии концентрирования растворов и достижения высоких концентраций сухих веществ в конечном продукте [24, 27].

Хотя многие исследователи доказали эффективность использования микроволновых установок для концентрирования, это относится к лабораторным установкам, а полученные зависимости не позволяют использовать их в проектировании промышленных образцов оборудования для концентрирования фруктовых и овощных соков [25]. Практическая реализация результатов экспериментальных исследований требует решения вопросов, связанных с поиском рациональных научно-технических предложений по конструкции инновационной микроволновой вакуум-выпарной установки.

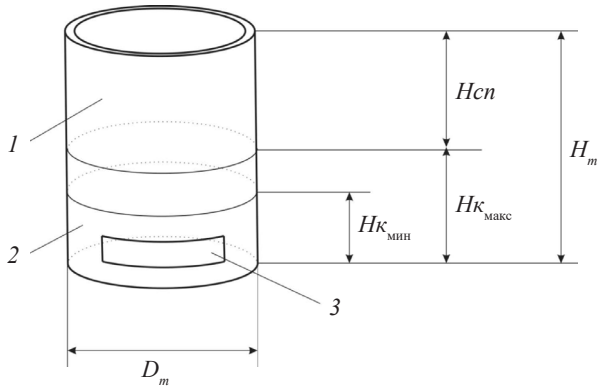
Объекты и методы исследования

Современные тенденции совершенствования тепломассообменного оборудования свидетельствуют о преимуществах многофункциональных установок модульного типа. В пищевых технологиях данное оборудование позволит загружать производство во время отсутствия сезонного сырья и легко перестраиваться к переработке разной растительной продукции. Главным требованием к модулю является простота управления при переходе на новый технологический регламент. При выборе геометрии рабочего объема модуля следует руководствоваться показателями его металлоемкости, технологичности изготовления и удобства эксплуатации. С точки зрения металлоемкости наиболее выгодной формой модуля является сфера. Однако аппараты цилиндрической формы более технологичны в изготовлении и удобны для использования в модульных аппаратах.

Основой конструкции модуля является цилиндрический корпус, изготовленный из радионепроницаемого металла. В корпусе имеется специальное окно для магнетрона, а с торцевых частей корпуса присоединены верхний и нижний фланцы. Верхний фланец оборудован патрубком для откачки воздуха перед началом процесса выпаривания и выхода вторичного пара. В нижнем фланце имеются патрубки для непрерывной подачи сырья и непрерывной выгрузки готового продукта [28].

Для модуля цилиндрической формы основными размерами являются диаметр (D_m) и высота (H_m) (рис. 1). Модуль условно делится на две зоны: зона кипения жидкого продукта и зона сепарации вторичного пара. Диаметр зоны кипения продукта должен быть не менее половины глубины проникновения СВЧ-поля в продукт. Диаметр зоны сепарации пара регламентируется влагонапряженностью парового пространства и скоростью движения пара в нем. Учитывая размеры модуля, целесообразно, чтобы обе зоны модуля имели одинаковый диаметр, т. е. были размещены в одной цилиндрической ёмкости. Это положительно скажется на надежности модуля, технологичности и стоимости его изготовления.

Таким образом, высота модуля складывается из высоты зоны кипения жидкости ($Hк_{макс}$) и высоты зоны



1 – зона сепарации пара, *2* – зона кипения продукта, *3* – окно присоединения волновода

Рисунок 1. Схема МВ-модуля

Figure 1. Microwave module diagram

сепарации пара (*Hcп*). Минимальная высота зоны кипения ($Hк_{мин}$) определяется высотой окна волновода для подвода микроволновой энергии плюс две глубины проникновения микроволнового поля в продукт. Высота зоны сепарации зависит от необходимого объема парового пространства и диаметра сепаратора.

Глубина проникновения поля зависит от длины волны и диэлектрических свойств материала и определяется по зависимости из работы [29]. Однако наличие паровых пузырьков в жидкости, с одной стороны, увеличивает рассеивание микроволнового излучения за счет многократных частичных отражений в местах перехода из жидкой фазы в паровую и из паровой в жидкую, а с другой – в паровой фазе затухание электромагнитной волны происходит слабее. Это ведет к увеличению глубины проникновения микроволнового излучения. Для того чтобы обеспечить эффективное поглощение микроволновой энергии жидкой фазой и минимизировать перегрев паровой фазы и отражение энергии обратно в излучатель, необходимо поддерживать уровень продукта над точкой ввода микроволнового излучения, превышающий минимально допустимый. Для определения такого уровня рассмотрели процесс образования и роста паровых пузырьков в жидкости.

В отличие от традиционных технологий выпаривания с кондуктивным энергоподводом, при котором пузырьки пара образуются на перегретых поверхностях, при микроволновом подводе энергии зародышами парообразования являются пузырьки газов, которые имеются в жидкости. Начальный диаметр паровых пузырьков может быть определен по значению минимальной температуры перегрева, при которой не происходит схлопывания паровых пузырьков:

$$\Delta T_{min} > \frac{4T''\times\sigma}{r\times\rho_{vap}\times Rp} \quad (1)$$

где T'' – температура насыщенного пара; r – удельная теплота парообразования; Rp – радиус газового пузырька.

Скорость роста парового пузырька можно определить с использованием числа Якоба [27]:

$$\frac{dRp}{d\tau} = \beta 1\frac{a}{Rp}Ja^2 \quad (2)$$

где Ja – число Якоба; c_p – изобарная теплоемкость жидкости; a – коэффициент температуропроводности; τ – время; $\beta 1$ – коэффициент учета дополнительных факторов (форма пузыря, динамические эффекты).

После интегрирования формула (2) имеет вид

$$Rp(\tau) = \sqrt{Rp_0^2 + \beta 1\times a\times Ja^2\times\tau} \quad (3)$$

где Rp_0 – начальный радиус парового пузырька.

Скорость всплытия парового пузыря зависит от его размеров и режима всплытия. Для ламинарного режима скорость определяется по формуле Стокса, а для турбулентного используется зависимость Лященко между числами Архимеда и Рейнольдса.

Использование зависимости Тодеса позволяет описать скорость всплытия пузырьков единой формулой

$$wp(\tau) = \frac{4\left[\sqrt{Rp_0^2 + \beta 1\times a\times Ja^2\times\tau}\right]g\left(\rho_{lic}-\rho_{vap}\right)}{18\mu_{lic} + 0{,}575\sqrt{\left[8\left(Rp_0^2 + \beta 1\times a\times Ja^2\times\tau\right)^{3/2} g\times\rho_{lic}\right]\left(\rho_{lic}-\rho_{vap}\right)}} \quad (4)$$

где μ_{lic} – вязкость жидкости; ρ_{lic}, ρ_{vap} – плотности жидкой и газовой фаз.

Так как основное количество паровых пузырей образуется на уровне расположения ввода СВЧ-излучения, то количество пузырей, которые образуются за необходимое для достижения паровым пузырем границы раздела фаз время, определено как отношение паропроизводительности модуля к паропроизводительности одного пузыря.

Паропроизводительность одного пузыря определяется как

$$G1p = \frac{4\times\pi\times Rp^3\times\rho_{vap}}{3\times\tau} \quad (5)$$

где τ – время всплытия.

Предположили, что зарождение паровых пузырей происходит через равные промежутки времени. Поэтому объемное паросодержение определили как отношение объема паровых пузырьков к объему парожидкостной смеси. Усредненная высота слоя жидкости на каждом уровне получается как отношение объема жидкой фазы, который определяется как разность объема парожидкостной смеси и объема пара, к площади поперечного сечения модуля.

При расчете общей высоты модуля необходимо принять во внимание возникновение в процессе кипения переходного парожидкостного слоя на границе жидкой и паровой фаз. Высота этой переходной зоны зависит от скорости образования и разрушения паровых пузырьков; может быть определена как

$$H_{pz} = 1{,}4\times10^3\times\frac{v_p\times\sqrt{\sigma\times\rho_{vap}}}{g\times\left(\rho_{lic}-\rho_{vap}\right)}\times \left(D_m\times\sqrt{\frac{\sigma}{g\left(\rho_{lic}-\rho_{vap}\right)}}\right)^{-1/4} \quad (6)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения; vp – скорость пара в модуле.

Высота паровой зоны модуля и диаметр парового сепаратора определяется из учета обеспечения его

минимального объема для заданной паропроизводительности, при котором максимальная скорость пара выбирается в зависимости от давления в модуле. Высота паровой зоны не должна превышать скорость витания капли [30].

Общая высота модуля H_m равна сумме высот жидкостной и паровой зон.

Результаты и их обсуждение

Выполненные теоретические исследования позволили разработать алгоритм расчета конструктивных параметров МВ-модуля (рис. 2). Исходными данными для расчета являются мощность магнетрона, частота излучения, вид продукта и давление в модуле. На втором этапе определяются температура кипения продукта в модуле, теплота парообразования, плотность жидкой и газовой фаз, а также действительная и мнимая диэлектрические проницаемости среды. На третьем этапе по формуле (12) из работы O. G. Burdo и др. рассчитывается параметрический комплекс безразмерного давления и симплекс удельной теплоты фазового перехода [31]. Это дает возможность по формуле (17) из работы O. G. Burdo и др. определить число энергетического действия [32]. На четвертом этапе из формулы (3) из работы А. В. Гаврилова можно установить паропроизводительность модуля (скорость влагоизвлечения) [33].

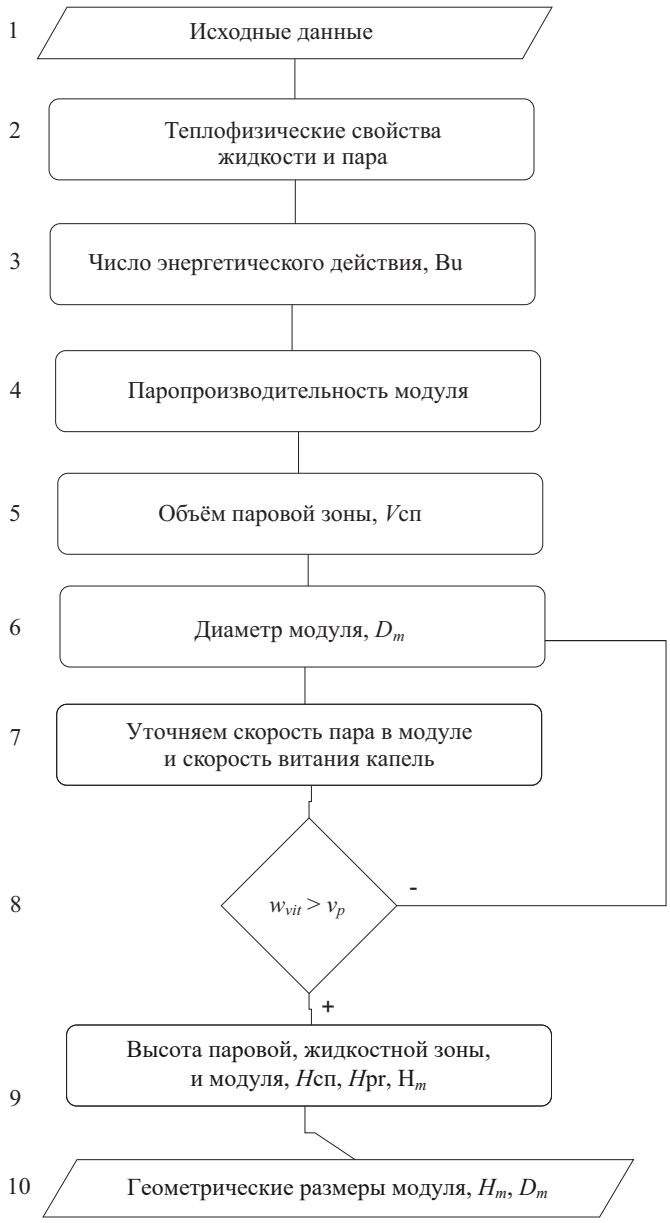


Рисунок 2. Алгоритм определения геометрических размеров модуля

Figure 2. Algorithm for determining the geometric dimensions of the module

На пятом этапе, в зависимости от вида сырья и давления в модуле, определяется допустимая паронапряженность паровой зоны, используя значение паронапряженности при атмосферном давлении и поправочный коэффициент, который учитывает давление в модуле и объем паровой зоны модуля как отношение паропроизводительности к допустимой паронапряженности. На следующем этапе устанавливается допустимая скорость пара в паровом пространстве модуля, а затем диаметр модуля. Получившееся значение *Dm* округляется до ближайшего типоразмера выпускаемых промышленностью труб. На седьмом этапе уточняется скорость пара в модуле, которая сравнивается на восьмом этапе со скоростью витания капли. Если скорость пара в модуле превышает скорость витания капли, то увеличивается диаметр модуля в соответствии с уточненным значением предельно допустимой скорости пара, которое равно скорости витания капли. Если скорость пара меньше скорости витания капли, то переходим к девятому этапу, на котором определяется высота паровой части модуля, используя зависимость, минимальный уровень жидкой фазы в модуле и общую высоту модуля. Алгоритм может быть дополнен блоком оптимизации массогабаритных показателей. В таком случае полученное отношение H_m/D_m сравнивается с заданным и в случае несоответствия корректируется значение диаметра модуля.

В соответствии с алгоритмом (рис. 2) для определения типовых размеров модуля приняли следующие начальные условия: рабочее давление в камере на уровне 7,4 кПа. Это соответствует температурам кипения водных растворов (около 40 °С). Такое условие принято исходя из условий эффективной работы данного модуля для использования в установках концентрирования термолабильных продуктов [33]. Для данного модуля предполагается использование излучателя электромагнитной энергии микроволнового диапазона с воздушным охлаждением. Диапазон мощностей промышленно выпускаемых излучателей находится в пределах 600–3000 Вт. Для данных условий комплекс безразмерного давления составил 1,48, симплекс удельной теплоты фазового перехода равен 4,57, а число энергетического действия Bu = 1,46.

Для магнетрона мощностью 600 Вт величина паропроизводительности составила 0,615 кг/ч. Напряженность парового пространства для водных растворов при атмосферном давлении находится в диапазоне 500–1000 кг/(м^3·с), а коэффициент, учитывающий давление в модуле, равен 0,8 [34]. Для заданных условий напряженность парового пространства составила 800 кг/(м^3·ч). Минимальный объем парового пространства для разделения парожидкостной смеси при таком значении напряженности составил 0,77 л. Максимальная скорость пара в паровом пространстве составила 6 м/с, а минимальный диаметр парового пространства 24 мм. Исходя из конструктивных соображений, а именно размеров сечения волновода, который передает энергию от магнетрона к модулю, минимальный диаметр модуля ограничен 100 мм. Значение действительной скорости пара в паровом пространстве для диаметра модуля 100 мм составляет 0,33 м/с. Это меньше скорости витания капель жидкости, равной 1,6 м/с. Минимальная высота паровой части модуля определяется как высота цилиндра объемом 0,77 л, диаметром 100 и составляет 98 мм. Высота переходного парожидкостного слоя, определенная по формуле (6), равна 21 мм. При установленной мощности магнетрона 1100 Вт минимальный объем парового пространства составил 1,4 л при минимальном диаметре 32 мм. Скорость движения пара в модуле диаметром 100 мм равна 0,61 м/с. Тогда высота парового пространства равна 179 мм, а высота переходного слоя 39 мм. Для снижения металлоемкости модуля возможно увеличение его диаметра до 150 мм. В таком модуле скорость пара равна 0,15 и 0,27 м/с для 600 и 1100 Вт мощности излучателя соответственно. Минимальная высота парового пространства равна 43 и 79 мм, а высота переходной зоны 9 и 16 мм для 600 и 1100 Вт мощности излучателя соответственно.

Для обеспечения эффективного поглощения высота слоя жидкости над магнетроном должна быть больше глубины проникновения СВЧ-излучения в продукт. При частоте излучения 2,45 ГГц длина волны составляет 12,24 см. Глубина проникновения излучения в воду при значении действительной диэлектрической постоянной ε’ = 76 и мнимой диэлектрической постоянной ε’’ = 10,9 равна 15,6 мм. Параметры кипящего раствора зависят от начального радиуса парового пузырька. Радиус газовых пузырьков в воде находится в пределах от 6×10^{-10} до 3×10^{-5} м [35]. Согласно исследованию Б. Г. Емца усредненный радиус газового пузырька в воде приблизительно равен 2×10^{-7} м [36]. Для таких значений размеров газовых пузырьков минимальная температура перегрева составляет 9,3 К. Однако при снижении давления происходит рост диаметров газовых пузырьков, из-за чего температуры перегрева при экспериментальных исследованиях находились в пределах 5 К, что соответствует радиусу пузырька $5{,}6\times10^{-5}$ м [33]. В таких условиях для модуля диаметром 150 мм с излучателем мощностью 600 Вт определено распределение объемного паросодержания по высоте модуля (рис. 3). Усредненная высота слоя жидкости приведена на рисунке 4.

Как видно из зависимостей, на высоте слоя 42 мм над уровнем зарождения паровых пузырьков наблюдается 100 % паросодержание и практическое отсутствие жидкой фазы. Однако усредненная суммарная высота уровня жидкой фазы над излучателем составила 26 мм. Это превышает глубину проникновения излучения в жидкость и с учетом многократных частичных отражений от поверхностей раздела фаз обеспечивает эффективное поглощение СВЧ-энергии.

Для водных растворов при давлении 7,4 кПа по алгоритму из рисунка 2 рассчитали типоразмерный ряд

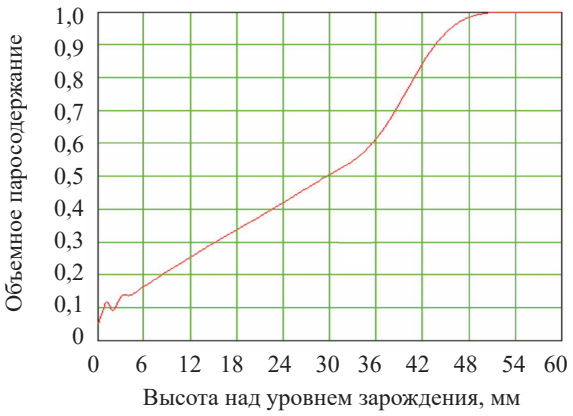


Рисунок 3. Зависимость объемного паросодержания от высоты над уровнем зарождения паровых пузырьков

Figure 3. Effect of nucleation level on the volumetric vapor content

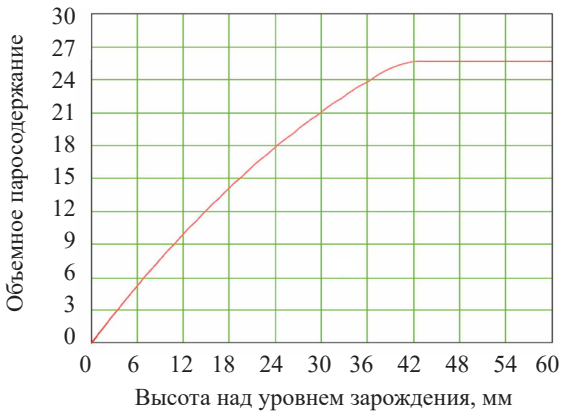


Рисунок 4. Зависимость суммарной высоты слоя жидкости от высоты над уровнем зарождения паровых пузырьков

Figure 4. Effect of nucleation level on total fluid level

Таблица 1. Типоразмерный ряд микроволновых выпарных модулей

Table 1. Size range of microwave evaporation modules

Наименование	Диаметр, мм	Высота, мм	Мощность, Вт	Производительность по выпаренной влаге, кг/ч
М1-06	100	250	600	0,615
М1-07			700	0,717
М1-09			900	0,922
М1-10			1000	1,024
М1-11			1100	1,127
М1У-06		450	600	0,615
М1У-07			700	0,717
М1У-09			900	0,922
М1У-10			1000	1,024
М1У-11			1100	1,127
М2-06	150	150	600	0,615
М2-07			700	0,717
М2-09			900	0,922
М2-10			1000	1,024
М2-11			1100	1,127
М2У-06		300	600	0,615
М2У-07			700	0,717
М2У-09			900	0,922
М2У-10			1000	1,024
М2У-11			1100	1,127
М2У-20			2000	2,049
М2У-30			3000	3,073

модулей с возможностью установки типовых выпускаемых промышленностью магнетронов с воздушным охлаждением мощностью от 600 до 3000 Вт. Для модулей диаметром 100 мм в целях унификации предусмотрена возможность установки излучателей электромагнитной энергии мощностью от 600 до 1100 Вт и принята высота модуля 250 мм, которая обеспечивает возможность концентрирования водных растворов при максимальной мощности излучателя. В случае концентрирования сильнопенящихся растворов мощность излучателя может быть снижена, например, для гранатового сока, или можно использовать удлиненные модули длиной 450 мм, что обеспечивает удвоенную высоту парового пространства [12, 34]. Модуль диаметром 150 мм имеет две модификации: первая (высота 150 мм) обеспечивает наименьшую металлоемкость модуля, вторая (высота 300 мм) применяется для пенящихся растворов. Обе модификации позволяют устанавливать излучатели электромагнитной энергии микроволнового диапазона мощностью от 600 до 3000 Вт.

Представленные в таблице 1 модули могут использоваться как в установках, реализующих непрерывный

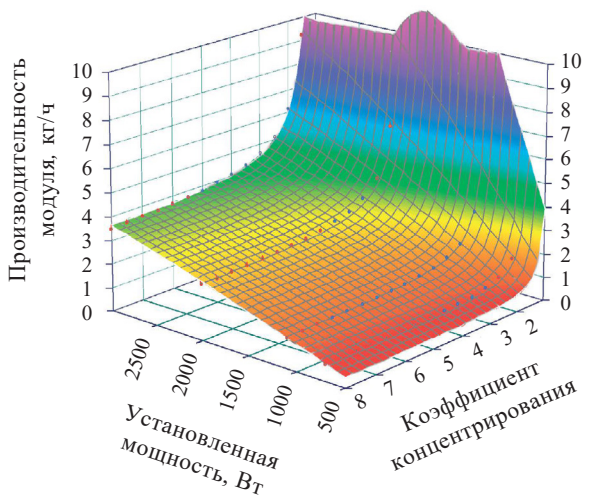


Рисунок 5. Зависимость производительности модуля по сырью от коэффициента концентрирования и установленной мощности магнетрона

Figure 5. Effect of Kk and magnetron power on raw material production

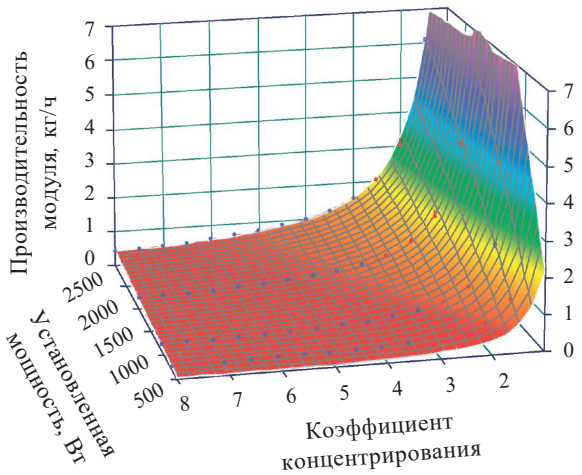


Рисунок 6. Зависимость производительности модуля по концентрированному продукту от коэффициента концентрирования и установленной мощности магнетрона

Figure 6. Effect of Kk and magnetron power on concentrate production

процесс выпаривания, так и в установках периодического действия. При реализации непрерывного режима основными параметрами являются производительность модуля по сырью и готовому продукту. Учитывая, что эти параметры зависят от начальной и конечной концентрации продукта, то был принят коэффициент концентрирования как отношение концентрации сухих веществ в продукте на выходе из модуля к концентрации сухих веществ в продукте на входе в модуль. Производительность модуля по сырью и концентрированному продукту зависит от коэффициента концентрирования и установленной мощности магнетрона. Такие зависимости для разработанных модулей в диапазоне коэффициента концентриования от 1,5 до 8, представлены на рисунках 5 и 6.

Обобщение данных в программе Table Curve 3D позволило определить общий вид уравнения для инженерного расчета производительности модуля по сырью $G_н$, кг/ч, (рис. 5) и конечному продукту $G_к$, кг/ч, (рис. 6) при заданных параметрах мощности и коэффициента концентрирования в виде экспоненциальных зависимостей:

$$G_н = e^{8,42+\frac{-57,4}{\ln(N)}+\frac{2,18}{Kk^2}} \quad (7)$$

$$G_к = e^{4,28+\frac{-57,4}{\ln(N)}+\frac{5,74}{\sqrt{Kk^2}}} \quad (8)$$

где N – установленная мощность магнетрона, Вт; *Кк* – коэффициент концентрирования.

Увеличение установочной мощности в 2 раза (с 1000 до 2000 Вт) ведет к повышению производительности в 2 раза, а стоимости в 15 раз (резко возрастает стоимость магнетрона). Это ограничивает экономическую целесообразность использования 2-ух и 3-х кВт магнетронов. Это также ограничивает максимальную производительность модуля, что увеличивает количество необходимых для достижения заданной производительности и усложняет саму установку модулей. Указанный недостаток становится менее существенным, если применение данных установок рекомендовано для финальной стадии концентрирования в том случае, если целесообразно повышение концентрации конечного продукта до значений, практически недостижимых в традиционных ВВУ, когда основная масса растворителя уже выпарена.

Выводы

С точки зрения материалоемкости, технологичности изготовления, удобства эксплуатации и монтажа наиболее удачной является цилиндрическая форма модуля с одинаковыми диаметрами жидкостной и паровой зон.

Полученный при помощи разработанных алгоритмов расчета и оптимизации геометрических параметров модулей типоразмерный ряд, который позволяет использовать весь диапазон мощностей промышленно выпускаемых излучателей электромагнитной энергии с воздушным охлаждением, позволяет проектировать микроволновые модульные вакуум выпарные установки заданной производительности, используя зависимость 7 или 8.

Применение в модулях излучателей электромагнитной энергии СВЧ-диапазона мощностью более 1,1 кВт приводит к увеличению стоимости модуля. Это позволяет рекомендовать разработанные модули

для использования в установках для финальной стадии концентрирования продуктов до концентраций 60–80 % и более.

Критерии авторства

А. В. Гаврилов – общая идея, обоснование цели и задач, проведение эксперимента. Ю. Б. Гербер – техническое обеспечение проведения экспериментов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Благодарности

Авторы выражают благодарность руководству ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского» в предоставлении доступа к учебно-технологической лаборатории Института «Агротехнологическая академия» для получения экспериментальных данных.

Contribution

A.V. Gavrilov developed the research concept, set up the objectives, and conducted the experiments. Yu.B. Gerber provided the technical support for the experiments.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the university management for providing access to the academic and technological laboratory of the Agrotechnological Academy Institute, V.I. Vernadsky Crimean Federal University.

References

1. Tabakaev AV, Tabakaeva OV, Prikhodko YuV. Functional instant beverages. Foods and Raw Materials. 2023;11(2): 187–196. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-2-565

2. Reznichenko IYu, Frolova NA, Kuchebo VV, Turov SV. Syrups in sugar confectionery products of high nutritional value. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(1):62–69. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-62-69

3. Ojileh PC, Okechukwu QN. Value-added zobo drink with date juice. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(3):545–553. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2453

4. Shalunov AV, Khmelev VN, Terentiev SA, Nesterov VA, Golykh RN. Ultrasonic dehydration of food products with moisture removal without phase transition. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(2):363–373. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-363-373

5. Gavrilov AV. Researching of process energy technologies development of vegetative raw materials. Transactions of Taurida Agricultural Science. 2018;179(16):82–89. (In Russ.). [Гаврилов А. В. Исследование энерготехнологий процессов обезвоживания растительного сырья // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2018. Т. 179. № 16. С. 82–89.]. https://elibrary.ru/MJXFAL

6. Burdo OG, Ruzhitskaya NV, Makarenko TA, Malashevich SA. Concentrating stevia extracts in a microwave vacuum evaporation unit. Scientific works of the Odessa National Academy of Food Technologies. 2015;47(2):67–70. (In Russ.). [Концентрирование экстрактов стевии в микроволновой вакуум-выпарной установке / О. Г. Бурдо [и др.] // Научные труды Одесской национальной академии пищевых технологий. 2015. Т. 47. № 2. С. 67–70.]. https://elibrary.ru/YGUYAP

7. Dzhangiryan VG, Krivenko IV, Namestnikov VV, Afanasev AG, Prokhorov EN. Method and installation for concentration of acids. Russia patent RU 2651253C1. 2018. [Способ и установка для концентрирования кислот: пат. 2651253C1 Рос. Федерация. № 2016141084 / Джангирян В. Г. [и др.]; заявл. 19.10.2016; опубл. 18.04.2018. Бюл. № 11. 25 с.].

8. Syomochkin AS, Khatsrinov AI, Khakimov MF, Namestnikov VV, Gatina RF. Microwave radiation for concentrating sulfuric acid in vacuum. Bulletin of Kazan Technological University. 2010;(8):410–411. (In Russ.). [Применение СВЧ-излучения для концентрирования серной кислоты в вакууме / А. С. Сёмочкин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 8. С. 410–411.]. https://elibrary.ru/MVNDYV

9. Li H, Zhao Z, Xiouras C, Stefanidis GD, Li X, Gao X. Fundamentals and applications of microwave heating to chemicals separation processes. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019;114. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109316

10. Liu K, Zhao Z, Li H, Gao X. Microwave-induced vapor-liquid mass transfer separation technology – full of breakthrough opportunities in electrified chemical processes. Current Opinion in Chemical Engineering. 2023;39. https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100890

11. Ge X. Experimental study on concentrating apple juice by microwave. Advance Journal of Food Science and Technologies. 2014;6(4):544–546. https://doi.org/10.19026/ajfst.6.70

12. Yousefi S, Emam-Djomeh Z, Mousavi SMA, Askari GR. Comparing the effects of microwave and conventional heating methods on the evaporation rate and quality attributes of pomegranate (*Punica granatum* L.) juice concentrate. Food and Bioprocess Technology. 2012;5:1328–1339. https://doi.org/10.1007/s11947-011-0603-x

13. Dinçer C, ÇAM İB, TORUN M, Başünal Gülmez H, TOPUZ A. Mathematical modeling of concentrations of grape, pomegranate and black carrot juices by various methods. The Journal of Food. 2019;44(6):1092–1110. https://doi.org/10.15237/gida.GD19080

14. Bozkir H, Baysal T. Concentration of apple juice by vacuum microwave evaporator and in comparison to rotary evaporator. Journal of Food Processing and Technology. 2017;8(9):128. https://doi.org/10.4172/2157-7110-C1-069

15. Bozkir H, Baysal T. Concentration of apple juice using a vacuum microwave evaporator as a novel technique: Determination of quality characteristics. Journal of Food Process Engineering. 2017;40(5). https://doi.org/10.1111/jfpe.12535

16. Dinçer C. Effect of intermittent microwave vacuum concentration on quality parameters of apple juice and sour cherry nectar and mathematical modeling of concentration. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. 2021; 55(3):175–196. https://doi.org/10.1080/08327823.2021.1952837

17. Lohrasbi-Nejad S, Shahedi M, Fathi M. Comparative study of microwave-assisted vacuum evaporation, microwave-assisted evaporation, and conventional evaporation methods on physicochemical properties of barberry juice. Journal of Agricultural Science and Technology. 2021;23(2):307–317.

18. Chua LS, Leong CY. Effects of microwave heating on quality attributes of pineapple juice. Journal of Food Processing and Preservation. 2020;44(10). https://doi.org/10.1111/jfpp.14786

19. Kumar A, Shrivastava SL. Temperature, concentration, and frequency dependent dielectric properties of pineapple juice relevant to its concentration by microwave energy. Journal of Food Process Engineering. 2019;42(3). https://doi.org/10.1111/jfpe.13013

20. Bozkir H, Tekgül Y. Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: Thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. Journal of Food Processing and Preservation. 2022;46(6). https://doi.org/10.1111/jfpp.15902

21. Trushechkin AV. Scientific support and equipment for two-stage vacuum evaporation of multicomponent vegetable mixes. Cand. eng. sci. abstract diss. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies; 2013. 18 p. (In Russ.). [Трушечкин А. В. Научное обеспечение процесса двухстадийного вакуум-выпаривания поликомпонентных овощных смесей и разработка оборудования для его реализации: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.18.12. Воронеж, 2013. 18 с.].

22. Tao Y, Yan B, Zhang N, Wang M, Zhao J, Zhang H, *et al.* Microwave vacuum evaporation as a potential technology to concentrate sugar solutions: A study based on dielectric spectroscopy. Journal of Food Engineering. 2021;294. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110414

23. Asghar MT, Yusof YA, Mokhtar MN, Yaacob ME, Ghazali HM, Varith J, *et al.* Processing of coconut sap into sugar syrup using rotary evaporation, microwave and open heat evaporation techniques. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2020;100(10):4012–4019. https://doi.org/10.1002/jsfa.10446

24. Alvi T, Khan MKI, Maan AA, Nazir A, Ahmad MH, Khan MI, *et al.* Modelling and kinetic study of novel and sustainable microwave-assisted dehydration of sugarcane juice. Processes. 2019;7(10). https://doi.org/10.3390/pr7100712

25. Tao Y, Yan B, Zhang N, Wang M, Zhao J, Zhang H, *et al.* Microwave vacuum evaporation as a potential technology to concentrate sugar solutions: A study based on dielectric spectroscopy. Journal of Food Engineering. 2021;294. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110414

26. Tao Y, Yan B, Zhang N, Zhao J, Zhang H, Chen W, *et al.* Decoupling thermal effects and possible non-thermal effects of microwaves in vacuum evaporation of glucose solutions. Journal of Food Engineering. 2023;338. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111257

27. Burdo OG, Gavrilov AV, Sirotyuk IV, Ruzhitskaya NV, Goncharov DS. Electrodynamic apparatuses for solutions' concentration. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2022;58(3):290–298. https://doi.org/10.3103/S1068375522030073

28. Gerber YuB, Gavrilov AV. The device of a continuous microwave vacuum evaporator. Russia patent RU 213932U1. 2022. [Устройство микроволновой вакуум-выпарной установки непрерывного действия: пат. 213932U1 Рос. Федерация. № 2022111823 / Гербер Ю. Б., Гаврилов А. В.; заявл. 28.04.2022; опубл. 05.10.2022. Бюл. № 28. 6 с.].

29. Vankatesh MS, Raghavan GSV. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. Biosystems Engineering. 2004;88(1):1–18. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.01.007

30. Kutepov AM, Sterman LS, Styushin NG. Hydrodynamics and heat transfer during vaporization. Moscow: Vysshaya shkola; 1986. 447 p. (In Russ.). [Кутепов А. М., Стерман Л. С., Стюшин Н. Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М.: Высшая школа, 1986. 447 с.].

31. Burdo OG, Trishyn FA, Terziev SG, Gavrilov AV, Sirotyuk IV. Electrodynamic processes as an effective solution of food industry problems. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2021;57(3):330–344. https://doi.org/10.3103/S1068375521030030

32. Burdo OG, Gavrilov AV, Sirotyuk IV, Ruzhitskaya NV, Goncharov DS. Electrodynamic apparatuses for solutions' concentration. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2022;58(3):290–298. https://doi.org/10.3103/S1068375522030073

33. Gavrilov AV. Experimental modeling of the vaporization of liquid solutions under vacuum and microwave field conditions. Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education “Moscow State Agro-engineering University named after V.P. Goryachkin”. 2020;95(1):41–50. (In Russ.). https://doi.org/10.34677/1728-7936-2020-1-41-50

34. Lashchinskiy AA, Tolchinskiy AR. Fundamentals of chemical equipment design and calculation. Moscow: Al′yans; 2011. 752 p. (In Russ.). [Лащинский А. А., Толчинский А. Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. М.: Альянс, 2011. 752 с.].

35. Borts BV, Kazarinov YuG, Skoromnaya SF, Tkachenko VI. An experimental study of air bubbles dynamics in water at the rapid decompression. Journal of Kharkiv University. Physical Series: Nuclei, Particles, Fields. 2012;999(1):95–101. (In Russ.). [Экспериментальное исследование динамики пузырьков воздуха в воде при быстрой декомпрессии / Б. В. Борц [и др.] // Журнал Харьковского университета. Физическая серия: Ядра, Частицы, Поля. 2012. Т. 991. № 1. С. 95–101.].

36. Emets BG. Nuclear magnetic resonance as a method to determine the average sizes and concentrations of air bubbles in water. Technical Physics Letters. 1997;23(13):42–45. (In Russ.). [Емец Б. Г. Определение методом ядерного магнитного резонанса средних размеров и концентраций воздушных пузырьков, содержащихся в воде // Письма в журнал технической физики. 1997. Т. 23. № 13. С. 42–45.]. https://elibrary.ru/RYNFPZ