

6. Wiita A., Ainavarapu S., Huang H., Fernandez J. (2006). Force-dependent chemical kinetics of disulfide bond reduction observed with single-molecule techniques. //Proc. Natl. Acad. Sci., 103, N.19, 7222–7227.
7. Avdeyeva L. Yu., Ivanitskiy G.K. (2011). Primeneniye gidrodinamicheskoi kavitatsii v tehnologicheskoy protsessie polucheniya fosfolipidnykh nanostruktur.// Sovremennaya nauka: issledovaniya, rezultaty, tehnologii. Kiyev, NPVK Trianon, N.2(7), 59–65.
8. Ivanitskiy G.K., Avdeyeva L. Y., Makarenko A. A. (2016). Using the effects of hydrodynamic cavitation for purposeful dynamical action on the supramolecular structures. // Physics of Aerodisperse systems, N.53, 142–151.
9. Ivanitskiy G.K., Nedbayilo A.E (2011). Analiticheskoye issledovaniye kavitatsii v rabochem koleseye tsen-trobrezhnykh nasosov // Prom. teplotekhnika, 34, N2, 40–47.
10. Ivanitskiy G.K., Shurchkova Yu.A., Nedbayilo A.E (2012). Ispolzovaniye gidrodinamicheskoi kavitatsii dlya razrusheniya bakterialnykh kletok v tehnologii obrabotki moloka. // Prom. teplotekhnika, 34, N.3, 31–39.
11. Ivanitskiy G.K., Gozhenko L.P. (2014.). Analiticheskoye issledovaniye usloviy vozniknoveniya kavitatsii v trubie pulsatsionnogo dispergatora udarnogo tipa. // Prom. teplotekhnika, 36, N.6, 49–56.

УДК 663.918.23

## ИСПЫТАНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ЭКСТРАКТОРА В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА

Левтринська Ю.О., аспірант, Терзиев С.Г., д.т.н., доцент  
Одеська національна академія харчових технологій

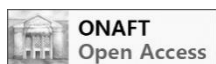
## MICROWAVE EXTRACTOR TESTING IN PRODUCTION CONDITIONS

Levtrinska Yu.O., graduate student, Terziev S.G., doctor of technical sciences, associate professor  
Odessa National Academy of Food Technologies

Copyright © 2017 by author and the journal “Scientific Works”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**Аннотация.** Микроволновый противоточный экстрактор – аппарат в котором организуется режим противоточного движения твердой фазы и экстрагента, что способствует более полному извлечению экстрактивных веществ из сырья в экстракт. Основой для выбора режимных и технологических параметров работы экстрактора, таких как расход экстрагента, мощность микроволновых генераторов, степень загрузки массообменных модулей, эквивалентный диаметр частиц сырья, стали исследования каждого из параметров на одном массообменном блоке экстрактора при неподвижном слое продукта и непрерывном движении экстрагента. На основе анализа полученных данных выбран режим работы для запуска экстрактора для производственных испытаний. Проведена апробация микроволнового противоточного экстрактора при получении концентрированного кофейного экстракта. Запуск экстрактора производился в условиях подвода микроволновой энергии, при расходе экстрагента 7 кг/ч. При проведении испытаний экстрактора использовано 3,2 кг сырья (кофе Арабика первого сорта) и получен кофейный концентрат с содержанием сухих веществ 30 % в объеме 3 л. Исследована зависимость степени загрузки экстрактора продуктом и концентрации экстракта на выходе из аппарата. Изучена степень влияния слоя продукта в массообменных модулях и количества касет. Верность гипотезы, согласно которой на выходе из экстрактора возможно получить кофейный концентрат с содержанием сухих веществ выше 50 %, подтверждается результатами экспериментальных исследований. Проведено прогнозирование, определяющее потенциал данного экстрактора. На основе результатов испытаний возможна дальнейшая оптимизация конструктивных параметров экстрактора для последующей разработки аппарата высокой производительности для нужд производства. Планируется внедрение экстракторов подобной конструкции и производительностью 72 кг/ч в производство.

**Abstract.** The microwave counter-flow extractor is a device in which one the anti-precise motion of the solid phase (ground coffee grains) and the extractant (prepared water) is organized, which facilitates a more complete extraction of the extractable substances from the raw material into the extract. The basis for selecting the operating and technological parameters of the extractor operation, such as the extractor consumption, the power of the microwave generators, the degree of mass-exchange modules raw material loading, the equivalent diameter of the raw material particles, the study of each of the parameters on one mass exchanger extractor unit with the fixed product layer and continuous movement of the extractant. Based on the analysis of the obtained

*data, the operating mode was selected for starting the extractor for production tests. Approbation of the microwave counter-flow extractor in the preparation of a concentrated coffee extract was carried out. The extractor was started with influence of electro-magnetic field kg and an extragent consumption of 7 kg / h. Loading of extractor amount 3.2 kg of raw materials (Arabica coffee of the first grade) and the coffee concentrate with a solids content of 30% in a volume of 3 liters were used in the tests of the extractor. The dependence of the extractor load on the product and the concentration of the extract at the outlet from the apparatus was studied. The degree of influence of the product layer in mass-exchange modules (cassettes) and the number of cassettes was studied. The validity of the hypothesis, according to which at the output of the extractor, it is possible to obtain a coffee concentrate with a solids content of more than 50...60 %, is confirmed by the results of experimental studies. Provided a prediction that determines the potential of this extractor. Based on the test results, further optimization of the design parameters of the extractor is possible for the subsequent development of a high-performance apparatus for production needs. It is planned to provide extractors of similar design with productivities 72 kg/h in production. The positive results obtained allow us to proceed to the development of a standard size range of microwave extractors and the application of such devices in the production*

**Ключевые слова:** экстрагирование, волновые технологии, массообмен, микроволновый экстрактор, кофепродукты, пищекопцентраты.

**Key words:** extraction, wave technologies, mass transfer, microwave extractor, coffee products, food concentrates.

**Введение.** Растворимый кофе – простой в приготовлении напиток, который обладает тонизирующими свойствами и является природным, легальным стимулятором. Сырье для получения растворимого кофе – кофейные зерна, или бобы, плоды кофейного дерева, которое выращивается исключительно в жарких экваториальных странах, к которым Украина не относится. Высокая стоимость сырья обуславливает потребность его максимально эффективного использования при переработке.

Для производства экстрактов кофе на отечественных предприятиях используются, в основном, устаревшие технологии. Возможны два пути развития оборудования для экстрагирования: эволюционный и революционный. В первом случае повышение качества продукции и энергоэффективности достигается путем развития уже существующих аппаратов, оптимизации их работы, применения более совершенных систем регулирования и энергоподвода. Однако, резерв повышения эффективности у таких методов невысок. При разработке инновационного оборудования идет поиск принципиально новых подходов к организации процесса, например, другие способы физического либо химического воздействия на продукт: ультразвук, сверхнизкие температуры и принципиально новые экстрагенты, инфракрасное и микроволновое излучение.

В Одесской национальной академии пищевых технологий активно развивается направление волновых технологий, к которым относится микроволновое экстрагирование. Данные технологии заложены в основу настоящего исследования.

**Формулировка задачи и анализ литературных источников.** В производстве кофепродуктов на украинских предприятиях для экстрагирования в настоящее время преимущественно применяются баротермические технологии (традиционные), такие как метод батарейной экстракции. В таких агрегатах экстрагирование осуществляется при повышенном давлении и температурах близких к 180 °С. В таких условиях достигается гидролиз целлюлозы и из дробленого кофейного сырья извлекается максимальное количество экстрактивных компонентов.

Вышеперечисленные особенности ведения процесса сопряжены с рядом вытекающих недостатков традиционных экстракторов. Во-первых, баротермические экстракторы металлоемки и конструктивно сложны, вмешательство в процесс после загрузки, либо простые методы интенсификации с помощью перемешивания невозможны при данных условиях. Во-вторых, из-за воздействия высоких температур ухудшается вкус продукта, кроме того неразрешенной остается проблема доизвлечения экстрактивных веществ из шлама. Общая концентрация экстрактивных веществ в кофейном шламе нередко превышает 4...5 % [1]. В зависимости от сорта кофе максимальное содержание экстрактивных водорастворимых сухих веществ (с.в.), которые возможно извлечь, колеблется от 25 % (высший сорт арабики) до 35 % (сорта робуста и либерика). Также, в зависимости от сорта может немного варьироваться химический состав сырья, так например в высших сортах арабики больше кофейного масла и ароматических веществ, а в робусте – хлорогеновой кислоты и танинов, что обуславливает отличия во вкусе готового напитка [2].

В ряде исследований в области экстрагирования из растительного сырья подтверждается эффективность использования микроволнового подвода энергии. Положительный эффект достигается при использовании экстрагентов, состоящих из полярных молекул, например воды или спирта [3]. Исследователями получен максимальный выход экстрактивных веществ при низких температурах без ущерба для термолабильных и легколетучих веществ [4]. Технологии микроволнового экстрагирования используются при обработке лекарственных трав [5], виноградных косточек [6], эвкалипта [7], кофе [8] и корня цикория [9]. Разработанные экстракторы представляют собой исследовательские установки небольшой производи-

тельностью и предназначены для обработки образцов объемом в среднем до 100 мл. Описания действующих образцов с высокой производительностью, предназначенных для условий производства, в открытых источниках информации не найдено.

В основу данного исследования положены научные положения, согласно которым реализация последовательных стадий: промывка истощенных кофейных зерен исходным экстрагентом, истощение целевых компонентов из капиллярных структур зерен и укрепления экстракта позволит создать эффективный противоточный аппарат. Второе научное положение утверждает, что использование в истощающей и укрепляющей зонах экстрактора подведения микроволновой энергии позволит инициировать мощный бародиффузионный поток целевых компонентов из объема сырья, что позволит при температурах процесса до 100 °С обеспечить практически полное извлечение целевых компонентов, снизить энергоемкость аппарата, повысить его производительность, обеспечить непрерывность технологии экстрагирования и повысить качество готового продукта. Для подтверждения этих гипотез необходимо проведение производственных испытаний экстрактора.

**Материалы и методы исследования.** Для эффективной эксплуатации и настройки режимов работы микроволнового противоточного экстрактора мало проведения эксперимента с одним массообменным модулем. При обратном движении экстрагента и экстрактанта имеет место сложная комбинация массообменных и гидродинамических процессов, образуются различные зоны влияния микроволнового поля, которые позволяют повысить эффективность работы аппарата.

Сырьем для экстрагирования был молотый кофе арабика первого сорта с дисперсным составом 3 ... 0,63 мм (> 3 мм – 5,4 %, 3,0 ... 2,5 – 13,8 %, 2 ... 2,5 – 21,8 %; 1 ... 2 – 52,2 %; 0,8 ... 1 – 6,38 %; 0,63 ... 0,8 – 0,24 %). Экстрагирование осуществлялось подготовленной водой. При получении экспериментальных данных использовались современные приборы, позволяющие получать результаты оперативно и точно. Для определения температур использовались пирометр излучения и тепловизор, для получения информации о концентрации экстракта применялся цифровой рефрактометр.

Экспериментальные исследования проводились на аппарате непрерывного действия, предназначенном для системы «твердое тело – жидкость», состоит из вертикального корпуса с устройствами ввода и вывода фаз, сборника экстракта и генераторов импульсной микроволновой энергии. Аппарат отличается тем, что его корпус выполнен из каскада стальных резонаторных камер оснащенных магнетронами. Камеры соединены между собой шлюзовыми каналами, через которые с помощью домкрата перемещаются кассеты с сырьем. Конструкция кассет предназначена для осуществления противоточного движения через них экстрагента. В крышке каждой кассеты имеется отверстие, в которое вводится патрубок верхней кассеты. Патрубок размещен на дне кассеты в противоположно отверстию. В каждой кассете имеется сетчатый фильтр перед входом патрубка. Вся конструкция выполнена из радиопрозрачного материала. Экстрагент подается через трубку в верхнюю кассету блока. Выходной патрубок последней кассеты блока соединяется с приемником экстракта, в котором накапливается готовый продукт. Камеры оснащены панелями управления, с помощью которых можно задавать мощность и время обработки, параметры отображаются на дисплее, встроенном в панель. В экстракторе предусмотрено регулирование расхода экстрагента и скорости движения кассет с продуктом.

**Результаты исследований.** При старте эксперимента в нижней камере был установлен блок из 4 кассет. Каждые две минуты добавлялась одна кассета с продуктом. Расход экстрагента составлял 7,2 кг / ч. В первом опыте серии исследований отработан первый цикл работы микроволнового противоточного экстрактора (МВПЭ). В кассеты было загружено 50 г молотого кофе и исследована кинетика экстрагирования, путем отбора проб экстракта на выходе из аппарата и определения его концентрации (рис.1).

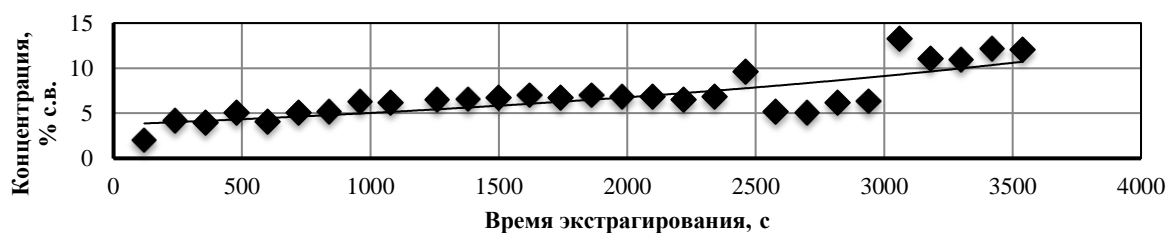


Рис. 1. Изменение концентрации экстракта на выходе из МВПЭ при загрузке кассет 50 г продукта.

На выходе из экстрактора после полной загрузки экстрактора по высоте получен экстракт кофе и относительной концентрацией сухих веществ 15 %. Вторым этапом исследования стало увеличение загрузки кассет до 100 г, остальные параметры были фиксированы. При планировании эксперимента предполагалось, что концентрация вырастет прямопропорционально загрузке кассет, то есть – в 2 раза. При проведении эксперимента был получен результат, показанный на рисунке 2.

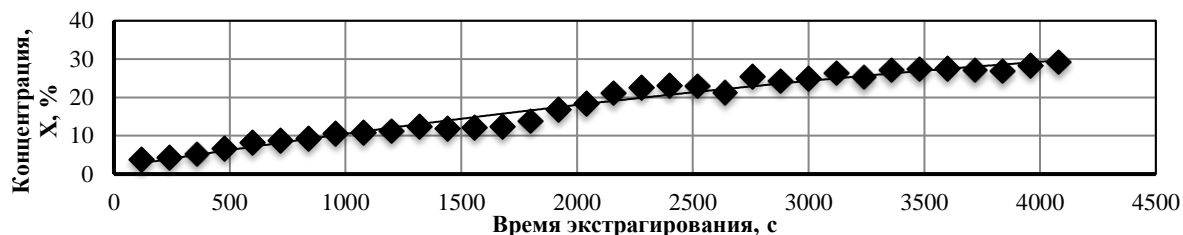


Рис. 2. Изменение концентрации экстракта на выходе из МВПЭ при загрузке кассет 100 г продукта.

Експериментальні дослідження підтвердили верність гіпотези, стосовно впливу завантаження касети на концентрацію екстракту. На виході отримано екстракт з концентрацією сухих речовин 29 %. Згідно з результатами випробувань розроблено прогнозний графік, представлений на рисунку 3. Згідно з прогнозом, при збільшенні завантаження до 300 г можливо отримати рідкий концентрат кави з вмістом сухих водорозчинних речовин 50...60 %.

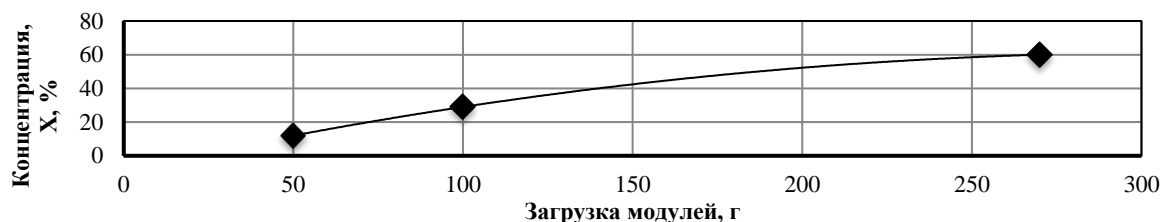


Рис. 3. График с прогнозированием результата для различной загрузки кассет.

Прогнозована характеристика нелінійна, так як на більш ранніх етапах проводилась оцінка впливу різних режимних параметрів на процес екстрагування, в тому числі – рівня продукту в касетах (рис. 4). Отримані характеристики вказують на те, що з збільшенням товщини шару в касетах ефективність вилучення з сировини незначально знижується.

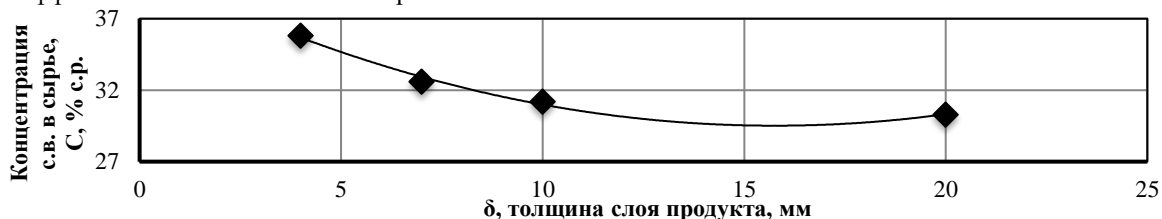


Рис. 4. Влияние толщины слоя продукта на содержание экстрактивных веществ в зернах кофе.

По завершенню проходження касети по всій висоті мікрохвильового екстрактора проведена оцінка ефективності вилучення сухих речовин. Верхня касета блоку, яка пройшла по всій висоті екстрактора, удалена з блоку, а шлам перевірено на вміст сухих речовин за стандартною методикою.

Отримані 100 грамів вологого шламу, вологосодержання якого становило 84,6% поміщені в лабораторний мікрохвильовий екстрактор з обертовим холодильником і в нерухомому шарі з шламу доцільно вилучали компоненти. Експеримент проводився до тих пор, поки екстракт набув помітної окраски неозброєним оком. На рисунку 5 представлені результати доцільного вилучення сухих речовин з шламу, отриманого після проходження касети по висоті мікрохвильового екстрактора.

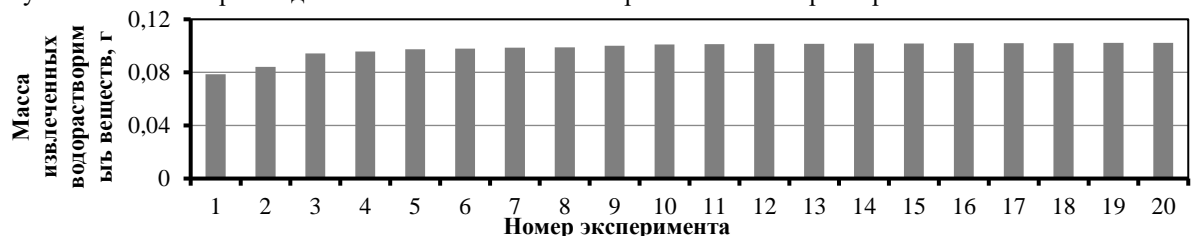


Рис. 5. Процесс доизвлечения сухих веществ из кофейного шлама.

Згідно з результатами експерименту, в шламу залишилося 0,65 % екстрактивних речовин, що добре узгоджується з метою, поставленою в дослідженні. Можливо говорити про те, що дана технологія і апарат ресурсоефективні і дозволяють підвищити резерви використання сировини. Отриманий на виході екстрактор концентрат рідкого кави з вмістом сухих речовин 50...60 % представляє собою

современный аналог сухого растворимого кофе, при этом сохраняет пищевую ценность продукта и качество сравнимое с натуральным. Исключение этапа сушки позволит значительно повысить энергоэффективность.

**Выводы:** Проведение производственных испытаний подтверждает научные положения исследований, согласно которым реализация последовательных стадий промывки истощенных кофейных зерен исходным экстрагентом, исчерпывания целевых компонентов из капиллярных структур зерен и укрепление экстракта позволит создать эффективный противоточный аппарат, а также, что использование на стадии исчерпывающей и укрепляющей зоны подвода микроволновой энергии позволяет инициировать мощный бародиффузионный поток целевых компонентов из объема зёрен, что даст возможность при температурах процесса до 100 °С обеспечить практически полное извлечение целевых компонентов, снизить энергоёмкость аппарата, повысить его производительность, обеспечить непрерывность технологии экстрагирования и повысить качество готового продукта. Микроволновый проточный экстрактор позволяет в зависимости от загрузки массообменных модулей получать на выходе из аппарата экстракт с концентрацией сухих веществ 20 ... 60 %. При прохождении по всей высоте микроволнового экстрактора кассеты с кофе из измельченных зерен удастся сократить потери экстрактивных веществ со шламом до 0,6 %. Данный аппарат можно отнести к энерго- и ресурсоэффективным.

#### Литература.

1. Процессы переработки кофейного шлама / Бурдо О.Г. и др. Киев: «ЭнтерПринт», 2014. 228 с.
2. Jimenez-Zamora A., Pastoriza S., Rufian-Henares J.A. Revalorization of coffee by-products. Prebiotic, antimicrobial and antioxidant properties // LWT - Food Science and Technology. 2015. Vol. 61, P. 12-18
3. Lebovka N., Vorobiev E., Chemat F. Enhancing Extraction Processes in the Food Industry. LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business. 2012. 518 p.
4. Chemat F., Cravotto G. Microwave-assisted Extraction for Bioactive Compounds: Theory and Practice. Food Engineering Series, 2013, 238 p.
5. Flyrez N., Conde E., Domínguez H. Microwave assisted water extraction of plant compounds // Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2015. Vol. 90, Is. 4. P. 590-607.
6. Optimization of microwave-assisted extraction of phenolic antioxidants from grape seeds (*Vitis vinifera*). / Krishnaswamy K. et.al. // Food and Bioprocess Technology. 2013, Vol. 6, P. 441-455.
7. Microwave-assisted extraction of *Eucalyptus robusta* leaf for the optimal yield of total phenolic compounds / Bhuyan D.J., et.al. // Industrial Crops and Products. 2015. Vol. 69. P.1-10.
8. Microwave-assisted extraction of green coffee oil and quantification of diterpenes by HPLC / Tsukui A. et.al. // Food Chemistry. 2014. Vol.164. P. 266-271.
9. Microwave-Assisted Extraction of Inulin from Chicory Roots Using Response Surface Methodology. [Text] / Tewari S. et.al. // J. Nutr. Food Sci. 2015. Vol.5. P 342-349.

#### References

1. Burdo O.G., Terziev S.G., Ruzhitskaya N.V., Makievskaya T.L. (2014). Protsessyi pererabotki kofeynogo shlama, Kiev: «EnterPrint», 228 s.
2. Jimenez-Zamora A., Pastoriza S., Rufian-Henares J.A. (2015). Revalorization of coffee by-products. Prebiotic, antimicrobial and antioxidant properties, LWT - Food Science and Technology, 61, 12-18.
3. Lebovka N., Vorobiev E., Chemat F. (2012). Enhancing Extraction Processes in the Food Industry, Taylor & Francis Group, 518 p.
4. Chemat F., Cravotto G. (2013). Microwave-assisted Extraction for Bioactive Compounds: Theory and Practice, Food Engineering Series, 238 p.
5. Flyrez N., Conde E., Domínguez H. (2015). Microwave assisted water extraction of plant compounds, J.of Chem. Techn. and Biotechnol., 90(4), 590-607.
6. Krishnaswamy K., Orsat V., Gariépy Y., Thangavel K. (2013). Optimization of microwave-assisted extraction of phenolic antioxidants from grape seeds (*Vitis vinifera*), Food and Bioprocess Technology., 6, 441-455.
7. Bhuyan D.J., Vuong Q.V., Chalmers A.C., van Altena I.A., Bowyer M.C., Scarlett C.J. (2015). Microwave-assisted extraction of *Eucalyptus robusta* leaf for the optimal yield of total phenolic compounds., Industrial Crops and Products, 69, 1-10/
8. Tsukui A., Santos Junior H.M., Oigman S.S., de Souza R.O.M.A., Bizzo H.R., Rezende C.M. (2014). Microwave-assisted extraction of green coffee oil and quantification of diterpenes by HPLC, Food Chem., 164, 266-271.
9. Tewari S., Ramalakshmi K., Methre L., Mohan Rao L.J. (2015). Microwave-Assisted Extraction of Inulin from Chicory Roots Using Response Surface Methodology, J. Nutr. Food Sci, 5, 342-349.