

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ЭКСТРАКЦИИ ИНУЛИНА С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

С.В. Янкевич, Г.В. Малинин

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,  
Московский пр. 15, 428015 Чебоксары, Россия, ds3617@mail.ru, malgrig6@mail.ru

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований воздействия ультразвуковых колебаний на инулинсодержащее сырье при разных вариациях гидромодуля, температуры и процесса перемешивания. Показан максимальный выход инулина при указанных вариациях. Собрана экспериментальная ультразвуковая установка на базе нового перспективного ультразвукового генератора с подмагничиванием, позволяющая работать с разными излучателями ультразвука. Разработана упрощенная методика определения энергетических параметров ультразвуковых колебаний для получения режима развитой кавитации и усиления ультразвукового эффекта при получении инулина из инулинсодержащего сырья. Определены оптимальные параметры нелинейных эффектов в химико-технологическом процессе получения инулина. Сделаны выводы по недостаткам экспериментальной ультразвуковой установки касательно энергетических характеристик вводимой ультразвуковой энергии.

Данное исследование проводилось с целью иллюстрации перспективности использования физических методов воздействия на среду для усиления экстракции инулина по сравнению с химическими способами.

**Ключевые слова:** экстракция; ультразвуковое воздействие; инулин; волновое сопротивление среды; развитая кавитация; интенсивность.

## METHOD OF DETERMINING ULTRASONIC ENERGY FOR ENHANCING EXTRACTION OF INULIN USING ULTRASONIC TECHNOLOGIES

S.V. Yankevich, G.V. Malinin

Chuvash State University,  
15 Moskovsky Ave., 428015 Cheboksary, Russia, ds3617@mail.ru, malgrig6@mail.ru

The present paper presents the results of experimental studies of the effect of ultrasonic oscillations on inulin-containing raw materials under different variations of the hydraulic module, temperature and mixing process. The maximum yield of inulin is shown under the specified variations. An experimental ultrasonic installation was assembled on the basis of a new promising ultrasonic generator with magnetization, which allows you to work with different ultrasound transducers. A simplified method of determining the energy parameters of ultrasonic oscillations has been developed to obtain a mode of developed cavitation and enhance the ultrasonic effect when producing inulin from inulin-containing raw materials. Optimal parameters of nonlinear effects in chemical-technological process of inulin production are determined. Conclusions were drawn on the disadvantages of the experimental ultrasonic installation regarding the energy characteristics of the introduced ultrasonic energy.

This study was conducted to illustrate the promise of using physical media techniques to enhance the extraction of inulin compared to chemical techniques. Other promising directions are also shown using also physical methods to improve inulin production technologies.

The use of ultrasonic technologies in the food industry in the future will be very much in demand by manufacturers since ultrasonic exposure improves the intensification of technological processes, increases the shelf life and reduces the cost of manufacturing the finished product.

**Keywords:** extraction; ultrasonic exposure; inulin; wave resistance of the medium; advanced cavitation; intensity.

### Введение

Ультразвуковые генераторы для интенсификации технологических процессов в пищевой промышленности можно приме-

нять для усиления экстракции сухих веществ из топинамбура или цикория с целью получения большего выхода инулина.

Объектом исследования являются ульт-

тразвуковые установки в технологических линиях производства инулина. Предметом исследования является ультразвуковое воздействие на инулинсодержащее сырье. Целью данной работы является практическое подтверждение усиления эффекта выхода инулина с помощью ультразвуковых технологий и разработка упрощенной методики определения необходимой ультразвуковой энергии. Задача работы состоит в том, чтобы научиться использовать и применять возможности ультразвука для интенсификации технологического процесса производства инулина.

### Приборы и материалы исследования

В ультразвуковой установке использовался ультразвуковой генератор с подмагничиванием силовой части [1]. Общая функциональная схема экспериментальной ультразвуковой установки представлена на рис. 1.

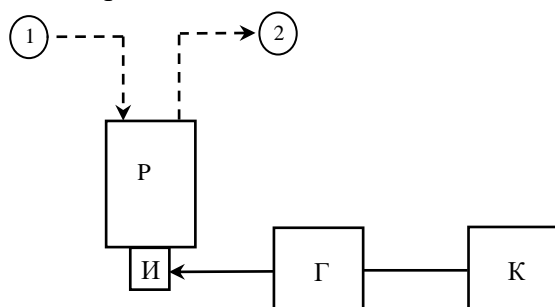


Рис. 1. Общая функциональная схема экспериментальной ультразвуковой установки по экстракции сухих веществ из топинамбура (цикория) с помощью ультразвука: Р – реактор, где происходит нагрев, перемешивание и ультразвуковая обработка; И – излучатели ультразвука; Г – ультразвуковой генератор для питания излучателей; К – компьютер для управления ультразвуковым генератором; 1 – подача стружки топинамбура или цикория из измельчителя; 2 – выгрузка жмыха

Fig. 1. General functional diagram of an experimental ultrasonic plant for extracting dry substances from girasol (chicory) using ultrasound: P - a reactor where heating, mixing and ultrasonic treatment take place; И - ultrasound transducer; Г - ultrasonic generator for transducer power supply; К - computer for ultrasonic generator control; 1 - supply of girasol or chicory chips from the grinder; 2 - burner unloading

Исследования включали проведение семи опытов по диффузии сухого вещества из инулинсодержащей стружки с

ультразвуковой обработкой и без нее (контроль). Оценка выхода инулина рассчитывалась из процентного выхода сухих веществ (как правило, в 100 % сухих веществ имеется 30-60 % чистого инулина). Поэтому максимальный выход сухих веществ дает также высокий выход самого инулина.

В качестве исходного сырья использовалась сухая стружка цикория. Варьировались гидромодуль (ГМ – соотношение веса сухой стружки и воды), температура процесса и дополнительно перемешивание. Процесс контролировался по содержанию сухого вещества в экстракте (основное вещество - инулин) и температуре. Исследования по влиянию ультразвука и гидромодуля на экстракцию растворимых сухих веществ в воду проводились при следующих условиях:

эксперимент 1:  $T = 62-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ГМ 1:8, контроль без ультразвука;

эксперимент 3:  $T = 60-64-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ГМ 1:8, ультразвук без перемешивания;

эксперимент 5:  $T = 52-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ГМ 1:10, ультразвук без перемешивания.

Полученные результаты по диффузии инулина из сухой стружки цикория представлены на рис. 2.

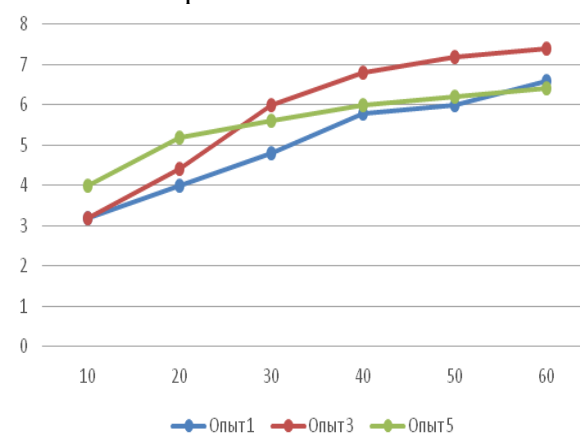


Рис. 2. Влияние ультразвука и гидромодуля на экстракцию (по оси абсцисс - время в мин., по оси ординат - выход сухих веществ в %)

Fig. 2. Effect of ultrasound and hydraulic module on extraction (along the abscissa axis - time in minutes, along the ordinate axis - yield of dry substances in%)

На основании проведенных экспериментов 1, 3, 5 можно сделать следующий

вывод: максимальное усиление экстракции растворимых сухих веществ в воду под действием ультразвука происходит в первые моменты времени начала работы устройства. Это связано с тем, что насыщенность воды газом находится на максимальном уровне в самом начале процесса. Далее вода дегазируется под действием ультразвука, и экстракция растворимых веществ в дальнейшем снижается.

Исследования по влиянию температуры, перемешивания и ультразвука на экстракцию растворимых сухих веществ в воду проводились при следующих условиях:

эксперимент 1:  $T = 62 - 65$  °С, ГМ 1:8, контроль без ультразвука;

эксперимент 2:  $T = 20 - 27$  °С, ГМ 1:8, ультразвук с перемешиванием;

эксперимент 3:  $T = 60 - 64 - 60$  °С, ГМ 1:8, ультразвук без перемешивания;

эксперимент 6:  $T = 59 - 42$  °С, ГМ 1:8, ультразвук с перемешиванием.

Полученные результаты по диффузии инулина из сухой стружки цикория представлены на рис. 3.

На основании проведенных экспериментов 1, 2, 3, 6 можно сделать следующие выводы:

1. Проведение экстракции при более высокой температуре повышает интенсивность накопления растворимых сухих веществ в экстракте.
2. Проведение экстракции с использованием перемешивания при ультразвуковой обработке значительно интенсифицирует процесс диффузии, особенно в начале, так и при увеличении времени обработки.
3. Применение ультразвуковой обработки повышает температуру процесса, что приводит к интенсификации процесса.

### Результаты и их обсуждение

Таким образом, процесс накопления сухого вещества и, следовательно, инулина протекает интенсивнее с применением ультразвуковой обработки. Возникают вопросы: достаточна ли вводимая ультразвуковая энергия для получения макси-

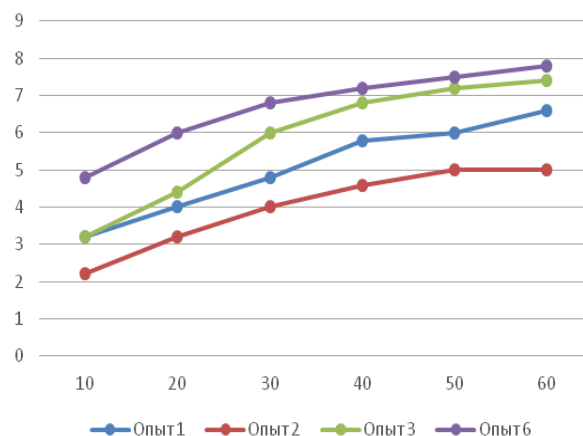


Рис. 3. Влияние температуры, перемешивания и ультразвука на экстракцию (по оси абсцисс - время в мин., по оси ординат - выход сухих веществ в %) Fig. 3. Effect of temperature, agitation and ultrasound on extraction (along the abscissa axis - time in minutes, along the ordinate axis - yield of dry substances in%)

мальной экстракции, каков режим работы установки при имеющейся интенсивности воздействия и каков минимальный порог вводимой ультразвуковой энергии?

Известно, что воздействие ультразвука на химико-технологические процессы осуществляется через эффекты первого и второго порядка. К эффектам первого порядка относят частоту, интенсивность, скорость, добротность и другие энергетические параметры ультразвуковой колебательной системы. К эффектам второго порядка относят нелинейные эффекты, развивающиеся в жидкости при распространении мощных акустических колебаний – кавитация (разрыв сплошности жидкости), акустические течения (звуковой ветер), пульсация газовых пузырьков и т. п.

Для упрощенной оценки энергетических показателей можно использовать эффекты первого порядка как теоретические расчетные физические величины, такие как частота, интенсивность воздействия и добротность. Упрощенную методику определения энергетических параметров ультразвука можно представить следующим образом. Экспериментальная установка, представленная на рис. 1, состоит из четырех излучателей ультразвука. Общая удельная механическая мощ-

ность колебательной системы экспериментальной установки будет определяться следующим соотношением:

$$P_{\text{Общ}} = n \cdot P, \quad (1)$$

где  $P$  - удельная механическая мощность одного излучателя,  $n = 4$  - количество излучателей.

Уравнение, по которому рекомендовано определять удельную механическую мощность одного излучателя, имеет вид [2]:

$$P = 0,063 \cdot V^2 \cdot Z \cdot S \cdot \delta_m^2 \cdot Q, \quad (2)$$

где  $V = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \xi_m$  - скорость распространения продольной волны в материале излучателя,  $f$  - резонансная частота излучателя,  $Z = \rho \cdot c$  - акустический импеданс излучателя,  $\rho$  - плотность материала излучателя,  $S$  - площадь поперечного сечения волновода излучателя,  $\delta_m$  - амплитуда относительного удлинения,  $Q$  - добротность излучателя.

К эффектам второго порядка относятся режимы, связанные с кавитацией в инулинсодержащей жидкости, характеризующиеся возникновением в жидкой среде кавитационных парогазовых пузырьков, которые, насыщая жидкую среду, образуют кавитационное облако, а это облако, в свою очередь, изменяет волновое сопротивление среды в сторону его уменьшения. Таким образом, для уменьшения волнового сопротивления среды необходимо увеличивать кавитационное облако в емкости, где озвучивается ультразвуком жидкая среда. Увеличение кавитационного облака зависит от роста количества кавитационных пузырьков  $b$  и линейно зависит от интенсивности ультразвукового воздействия  $I$  и определяется соотношением [3]:

$$b = \alpha \cdot (I - I_n), \quad (3)$$

где  $\alpha$  - экспериментально определяемая константа. Формула (3) описывает связь, в жидкой среде, между эффектами первого и второго порядка в ультразвуковой колебательной системе.

На графике рис. 4 видно, как с увеличе-

нием интенсивности ультразвукового воздействия  $I$  снижается волновое сопротивление среды [3].

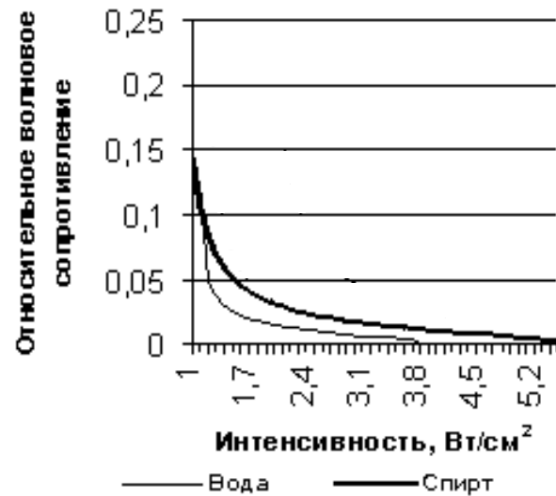


Рис. 4. Зависимость относительного волнового сопротивления среды от интенсивности воздействия для маловязких жидкостей: воды, спирта  
Fig. 4. Dependence of the relative wave resistance of the medium on the intensity of exposure for low-viscosity liquids: water, alcohol

Анализ представленных зависимостей на рис. 4 позволяет установить, что начиная с некоторого порогового значения волновое сопротивление обрабатываемой среды практически не изменяется, что соответствует режиму развитой кавитации. Неизменность волнового сопротивления, начиная с определенной пороговой интенсивности  $I_n$ , будем принимать в качестве критерия оптимальности вводимой УЗ энергии. Пороговая интенсивность воздействия  $I_n$  для создания большой кавитационной области и получения режима развитой кавитации, должна быть не ниже 3,8 Вт/см² (рис. 4). Экспериментальная ультразвуковая установка, показанная на рис. 1, имеет интенсивность воздействия  $I = 0,4$  Вт/см², и этого явно недостаточно для уменьшения волнового сопротивления среды и, следовательно, получения режима развитой кавитации во всем объеме реактора Р. Следовательно, экспериментальная ультразвуковая установка работает только в режиме зарождения кавита-

ции. Из (1) и (2) видно, что для увеличения интенсивности воздействия необходимо увеличивать  $n$ ,  $f$ ,  $Q$  или уменьшать площадь излучения  $S_{изл}$ .

### Заключение

Разработанная экспериментальная ультразвуковая установка позволяет повысить экстракцию инулина в пределах соответствующей интенсивности и работает в режиме зарождения кавитации, но не может работать в режиме развитой кавитации для осуществления максимальной экстракции. При дальнейшем проектировании ультразвуковых установок для использования их в технологических линиях производства инулина необходимо:

1. Выбирать излучатели ультразвука, которые могут работать на более высокой частоте и имеют хорошую добротность;
2. Увеличивать количество излучателей для повышения интенсивности воздействия для реализации режима развитой кавитации;
3. Выполнять расчет правильной геометрии изготовления технологических емкостей с минимальными размерами  $S_{изл}$  для реализации режима стоячей волны.

При определении нелинейных эффектов, необходимо:

1. Дополнительно подавать углекислый газ для продолжения кавитации;
2. Осуществлять перемешивание инулин-содержащей жидкости;
3. При большей продолжительности экстракции по времени температуру не повышать больше 60 °С, при меньшей продолжительности экстракции по времени температуру не повышать больше 80 °С.

### Библиографические ссылки

1. Янкевич С.В., Малинин Г.В. Обзор схемотехнических решений при построении силовой части ультразвуковых генераторов. *Вестник Чувашского университета* 2020; (1): 212-220.
2. Афанасьев В.А., Янкевич С.В. Магнитострикционные преобразователи и способы воздействия на колебательные системы. Материалы 9-й Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике». (5-7 июня 2014 года), г. Чебоксары. Чебоксары: Издательство ЧГУ; 2014. С. 38-42.
3. Хмелев В.Н. Повышение эффективности ультразвуковых технологических аппаратов для кавитационной обработки жидких сред высокой вязкости. Бийск: Издательство Алтайского государственного технического университета; 2019. 59 с.

### References

1. Yankevich S.V., Malinin G.V. Obzor skhemotekhnicheskikh resheniy pri postroenii silovoy chasti ul'trazvukovykh generatorov [Schematic solutions overview for construction of ultrasonic generators power unit] *Vestnik Chuvashskogo universiteta* 2020; (1): 212-220. (In Russian).
2. Afanas'ev V.A., Yankevich S.V. Magnitostriktionnye preobrazovateli i sposoby vozdeystviya na kolebatel'nye sistemy [Magnetostrictive transducers and methods of action on oscillating systems] *Materialy IX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike»*. (5-7 iyunya 2014 goda), g. Cheboksary. Cheboksary: Izdatel'stvo ChGU; 2014. p. 38-42. (In Russian).
3. Khmelev V.N. Povyshenie effektivnosti ul'trazvukovykh tekhnologicheskikh apparatov dlya kavitatsionnoy obrabotki zhidkikh sred vysokoy vyazkosti [Increased efficiency of ultrasonic process apparatus for cavitation treatment of liquid media of high viscosity] *Biysk: Izdatel'stvo Altayskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*; 2019. 59 p. (In Russian).