

УДК 66.084.8

А. А. Вьюгинова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

А. А. Лбов, Александр А. Новик, Алексей А. Новик

ООО «ИНЛАБ-Ультразвук»

Разработка методики ультразвукового процессирования химически агрессивных сред при повышенных температурах и давлении и соответствующего ультразвукового технологического оборудования

Рассмотрены аспекты физических основ функционирования и разработки соответствующего мощного ультразвукового технологического оборудования, предназначенного для работы с агрессивными средами в условиях повышенных температур и давления: особенности конструкторского исполнения, требования к акустической системе; особенности измерительных преобразователей и требования к системе управления. Спектр технологических процессов, осуществляемых с использованием энергии ультразвука при воздействии на жидкую среду, весьма широк – все они основаны на возникновении эффекта кавитации в жидкости и позволяют решать задачи эмульгирования, диспергирования, экстракции, гомогенизации и др. В некоторых случаях для ряда технологий необходимо сочетание воздействия ультразвука с воздействием высокой температуры и давления, использование кислот и щелочей. Рассмотренный пример такой системы позволяет производить обработку высококонцентрированного раствора щелочи в условиях повышенного давления и вакуума с температурой до 300 °С.

Ультразвук, ультразвуковое оборудование, ультразвуковая технология, диспергирование, деагломерация, эмульгирование, экстракция, сонохимия, повышенное давление, повышенная температура

Применение ультразвуковых технологий для перехода на новый уровень качества разнообразных технологических процессов, происходящих в жидкой среде, и для повышения их эффективности – это перспективное и активно развивающееся направление. Спектр технологических процессов, осуществляемых с использованием энергии ультразвука при воздействии на жидкую среду, весьма широк, среди них можно отметить:

1. Общие [1], [2]:

- ультразвуковое эмульгирование;
- ультразвуковое диспергирование;
- сонохимия (проведение химических реакций в ультразвуковом поле);
- ультразвуковое экстрагирование;
- ультразвуковая гомогенизация.

2. Частные:

– переработка биологических отходов: ультразвуковое диспергирование приводит к повышению растворимости и ускорению биодеграда-

ции [1], [3]; производство биотоплива: ультразвуковое диспергирование приводит к повышению выхода готового продукта [1], [4];

- ультразвуковая гомогенизация молока [2], [5];
- ультразвуковая экстракция из разнообразного растительного сырья таких компонентов, как антиоксиданты, масла, натуральные ароматизаторы и красители [6]–[11];
- экологически чистый органический синтез [2], [12]

В некоторых случаях для ряда технологий необходимо сочетание воздействия ультразвука с воздействием высокой температуры и давления, использование кислот и щелочей [13]–[16]. В данной статье рассмотрены особенности ультразвукового оборудования, предназначенного для реализации технологических процессов в агрессивных средах в сложных условиях.

Все перечисленные технологии основаны на эффекте ультразвуковой кавитации, который поз-

воляет реализовывать тонкое измельчение сред в жидкости (вплоть до наноразмерного), изменяет характер протекания химических реакций и создает условия для реализации ряда технологий – и это далеко не полный перечень возможностей использования данного эффекта [1], [2].

Для осуществления перечисленных технологий в промышленном масштабе требуется соответствующее таким задачам ультразвуковое технологическое оборудование: как правило, в таких случаях необходимо проводить обработку в проточном режиме, а соответственно, основой такого оборудования будет ультразвуковой проточный реактор (диспергатор). Ультразвуковой диспергатор (ультразвуковая проточная ячейка) – оборудование универсальное, но конструкционно система обработки конкретного сырья и соответствующее программное обеспечение должны быть адаптированы под конкретный процесс; в целом система будет состоять из N реакторов (диспергаторов) и набора функциональных блоков. На рис. 1 приведены скриншоты внешнего вида экрана программы управления процессом обработки сырья примерами мнемосхемы ультразвуковой системы: *а* – с одним диспергатором, *б* – с каскадом ультразвуковых диспергаторов.

Состав типовой проточной ультразвуковой системы включает два конструкционно разделенных функциональных блока [17]:

1. Блок, в котором происходит обработка сырья:

- несущая рама – выполняется из нержавеющей стали;
- накопительная емкость для готового продукта – одна или несколько;

– трубопроводы и запорная арматура – выполняются из нержавеющей стали;

– насосы для перекачивания сырья с необходимыми параметрами, материал насосов – нержавеющая сталь;

– теплообменники, радиаторы, теплоизоляция – для подогрева и охлаждения рабочей среды;

– набор датчиков – для управления и контроля, обеспечения безопасности;

– ультразвуковой проточный реактор (диспергатор) с акустической излучающей системой на основе магнитострикционного преобразователя и титанового волновода-излучателя; реактор и все сопряженные детали выполняются из нержавеющей стали – N шт.

2. Блок ультразвуковых генераторов, питающих магнитострикционные преобразователи реакторов, и автоматической системы управления технологическим процессом (1 каскад $\times N$) – может быть выполнен в виде стойки или отдельно стоящего блок-контейнера в зависимости от количества каскадов обработки:

– стойка для размещения оборудования – стандартная 19-дюймовая или специализированная;

– ультразвуковые генераторы – количество в зависимости от числа реакторов;

– частотные приводы для управления насосами, перекачивающими среду;

– система/системы охлаждения для магнитострикционного преобразователя – автономный блок принудительного водяного охлаждения, количество зависит от числа реакторов;

– персональный компьютер со специализированным ПО, обеспечивающим управление и протоколирование технологического процесса.

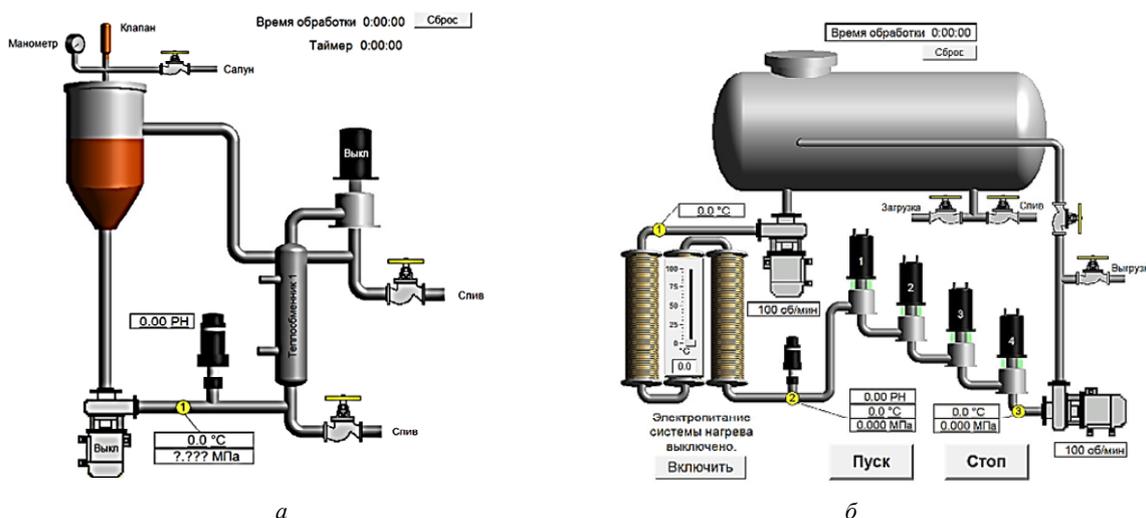


Рис. 1

На рис. 2 приведена фотография ультразвуковой системы с 6 каскадами: *а* – каскад ультразвуковых диспергаторов; *б* – блок-контейнер с ультразвуковыми генераторами и системой управления.

При разработке аппаратуры такого типа особое внимание необходимо уделить и системе автоматического управления, которая наряду со стандартными задачами поддержания необходимых технологических параметров должна обеспечивать безопасность обслуживающего персонала. Для решения этой задачи в АСУТП (автоматической системе управления технологическим процессом) должны быть предусмотрены дополнительные ресурсы (датчики аварийных величин, светосигнальные и звуковые индикаторы, блокировки срабатывания исполнительных устройств и т. д.). Примером системы управления такого типа может служить АСУТП обработки изделий в перегретой щелочной среде под давлением, разработанная и выполняемая в системе MasterSCADA v3.9.

На рис. 3 представлен скриншот внешнего вида экрана программы управления таким процессом: в левой части приведена мнемосхема процесса обработки сырья, в правой – тренды контролируемых параметров.

Система управления ультразвуковой системой, мнемосхема которой приведена на рис. 3, позволяет осуществлять управление и контроль набором технологических модулей:

- ультразвуковой обработки;
- вакуумирования;
- управления давлением рабочей зоны;
- управления инертной средой;
- управления температурой.

Для столь сложных условий решения такого комплекса разнообразных задач управления и обеспечения безопасности разработана система датчиков и определено необходимое количество и расположение точек контроля. В табл. 1 приведены диапазоны рабочих параметров рассматрива-



а

б

Рис. 2

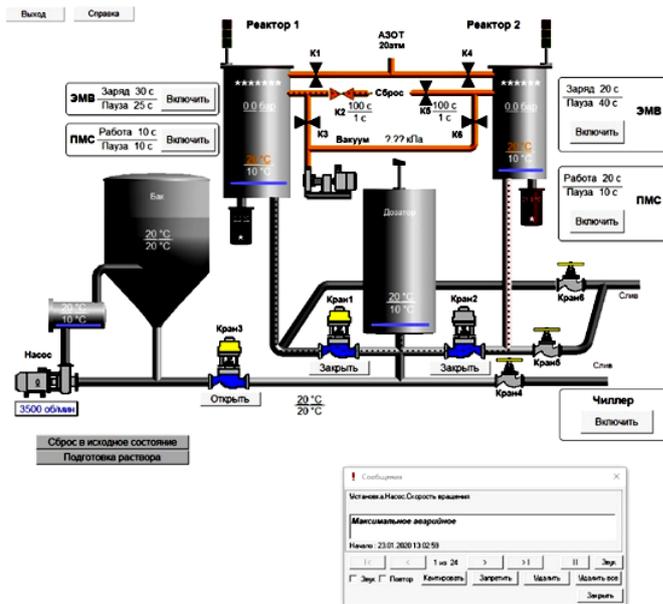
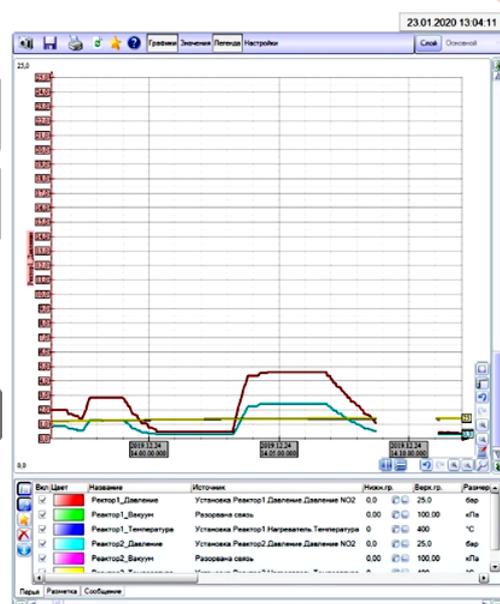


Рис. 3



емого оборудования – системы комплексной обработки щелочной рабочей среды (высококонцентрированного раствора щелочи): в системе контролируются температура и давление (глубина вакуума и величина избыточного давления) в двух ультразвуковых реакторах, уровень рабочей среды блока дозатора и ультразвуковых реакторов, мощность и время работы ультразвуковых модулей, скорость и направление подачи рабочей среды.

Таблица 1

Рабочий параметр	Диапазон значений
Температура, °С	20...280
Абсолютное давление в реакторе, кПа	2...1800
Мощность ультразвука, кВт	0...8

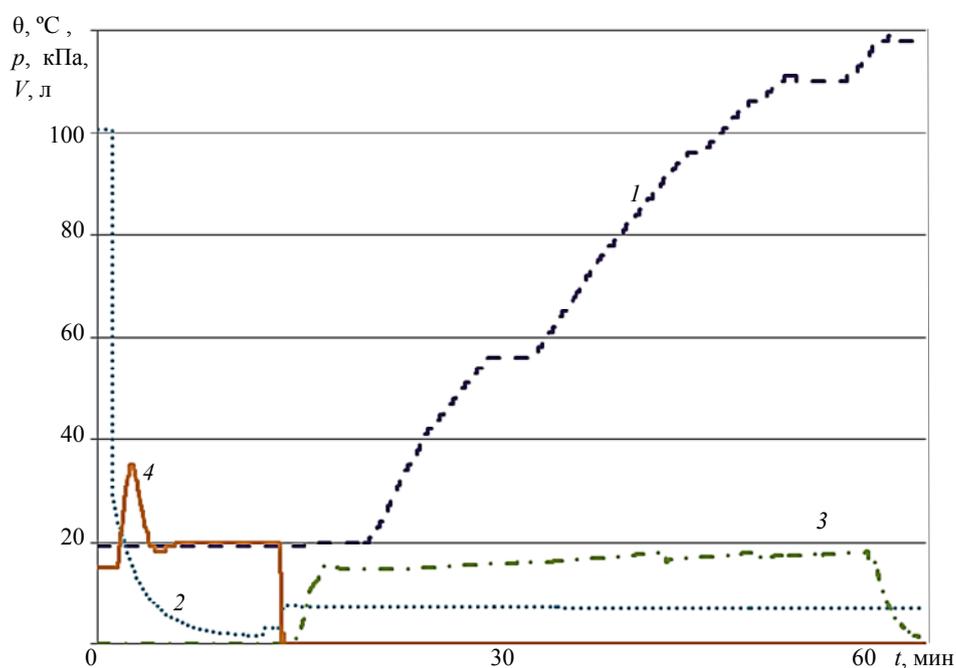


Рис. 4



а



б

Рис. 5

Помимо требований к конструктивному исполнению и автоматической системе управления специальные требования предъявляются и к волноводу-излучателю, который находится в непосредственном контакте с агрессивной средой. Они могут быть сформулированы следующим образом:

- низкая растворимость в конкретной среде;
- высокий модуль упругости;
- температурная стабильность упругих свойств;
- высокая усталостная прочность.

На рис. 5, а приведена фотография излучающей части титанового волновода, который несколько часов работал в щелочной среде при повышенных температуре и давлении; на рис. 5, б – ультразвуковой волновод после изготовления. По результатам ряда проведенных экспериментов был определен материал, подверженный минимальному износу в таких сложных условиях и обладающий необходимыми упругими свойствами.

Таким образом, материал волновода, предназначенного для работы в агрессивной среде, является определяющим для успеха разрабатываемой ультразвуковой технологии – недостаточная стойкость и быстрый износ волновода будут приводить к выходу оборудования из строя.

Система содержит два реактора, каждый из которых оснащен магнитострикционным преобразователем стержневого типа мощностью 4 кВт, подключенным к ультразвуковому генератору. Принудительное охлаждение магнитострикционных преобразователей реализовано с использованием термостабилизаторов рефрижераторного типа. Технические характеристики используемых ультразвуковых генераторов производства ООО «ИНЛАБ – Ультразвук» приведены в табл. 2, внешний вид ультразвукового генератора – на рис. 6.

Таблица 2

Параметр	Значение
Рабочая частота, кГц	20 ± 10 %
Напряжение питания, В	380, 3 фазы
Тип подключаемого ультразвукового преобразователя	Магнитострикционный
Тип охлаждения	Воздушное принудительное
Потребляемая мощность (не более), Вт	4500
Выходная мощность (не менее), Вт	4000
Габаритные размеры (не более), мм	440 × 560 × 240
Масса (не более), кг	14

Для измерения давления используются датчики избыточного давления и вакуумметр. Технические характеристики датчика давления фирмы «Piezус», который способен осуществлять измерение избыточного давления и выдерживать условия вакуума, и вакуумметра производства компании «BDSensors», приведены в табл. 3.



Рис. 6

Таблица 3

Параметр	Значение
Датчик давления	
Диапазон измерений, бар отн.	0...25
Погрешность измерений, %	0.5
Выходной сигнал, мА	4...20
Вакуумметр	
Диапазон измерений, бар абс.	0...1.0
Погрешность измерений, %	0.5
Выходной сигнал, мА	4...20

Для измерения температуры используется датчик производства компании «Овен», технические характеристики которого приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметр	Значение
Диапазон измерений, °С	0...400
Класс допуска	В
Показатель тепловой инерции (не более), с	30

Измерение уровня в системе было реализовано с использованием специализированного поплавкового датчика уровня, при этом конструктивно была решена задача защиты измерительного блока датчика от воздействия агрессивной рабочей среды.

Как было показано, в некоторых случаях для ряда технологий необходимо процессирование агрессивной среды при сочетании воздействия ультразвука с воздействием высокой температуры и давления. В статье рассмотрены особенности конструктивного исполнения оборудования для таких задач, особенности системы управления и контроля и приведены критерии выбора материалов для ультразвуковых модулей таких систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ультразвук. Аппараты и технологии / В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов, С. С. Хмелев, С. Н. Цыганок. Бийск: Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та, 2015.
2. Gallego-Juárez J. A., Graff K. F. Power Ultrasonics: Applications of High-intensity Ultrasound. Oxford: Woodhead Publishing, 2015
3. Neis U., Nickel K., Lundén A. Improving anaerobic and aerobic degradation by ultrasonic disintegration of biomass // Environmental Science and Health. 2008. Pt. A, № 43 (13). P. 1541–1545
4. Ultrasound-assisted fermentation enhances bioethanol productivity / A. Z. Sulaiman, A. Ajit, R. M. Yunus, Y. Cisti // Biochemical Engineering, 2011. № 54. P. 141–150.
5. Ertugay M., Sengul M. Effect of ultrasound treatment on milk homogenisation and particle size distribution of fat. // Turk J. Vet. Anim. Sci., 2004. Vol. 28. P. 303–308.
6. Comparison of conventional and ultrasound-assisted extraction of carvone and limonene from caraway seeds / S. Chemat, A. Lagha, H. Ait Amar, P. V. Bartels, F. Chemat // Flavour Fragr. J. 2004. Vol. 19, № 3. P. 188–195.
7. Ultrasound-assisted extraction of volatile compounds from citrus flowers and citrus honey / E. Alissandrakis, D. Daferera, P. A. Tarantilis, M. Polissiou, P. C. Harizanis // Food Chem. 2003. Vol. 82, № 4. P. 575–582.
8. Palma M., Barroso C. G. Ultrasound-assisted extraction and determination of tartaric and malic acids from grapes and winemaking by-products // Anal. Chim. Acta. 2002. Vol. 458, № 1. P. 119–130.
9. Lianfu Z., Zelong L. Optimization and comparison of ultrasound/microwave assisted extraction (UMAE) and ultrasonic assisted extraction (UAE) of lycopene from tomatoes // Ultrason. Sonochem. 2008. Vol. 15, № 5. P. 731–737.
10. Ultrasound assisted enhancement in natural dye extraction from beetroot for industrial applications and natural dyeing of leather / V. Sivakumar, J. L. Anna, J. Vijayeeswarri, G. Swaminathan // Ultrason. Sonochem. 2009. Vol. 16, № 6. P. 782–789.
11. Applications and opportunities for ultrasound assisted extraction in the food industry – A review / K. Vilku, R. Mawson, L. Simons, D. Bates // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2008. Vol. 9, № 2. P. 161–169.
12. Banitaba S. H., Safari J., Khalili S. D. Ultrasound promoted one-pot synthesis of 2-amino-4,8-dihydro-pyrano[3,2-b]pyran-3-carbonitrile scaffolds in aqueous media: a complementary 'green chemistry' tool to organic synthesis // Ultrason. Sonochem. 2013. Vol. 20. P. 401–407.
13. High-pressure ultrasonic-assisted extraction of polysaccharides from *Hovenia dulcis*: Extraction, structure, antioxidant activity and hypoglycemic / B. Yang, Q. Wu, Y. Luo, Q. Yang, X. Wei, J. Kan // Intern. J. of Biological Macromolecules. 2019. Vol. 137. P. 676–687.
14. Effect of ultrasonication, high pressure homogenization and their combination on efficiency of extraction of bio-molecules from microalgae *Parachlorella kessleri* / R. Zhang, N. Grimi, L. Marchal, N. Lebovka, E. Vorobiev // Algal Research. 2019. Vol. 40. P. 101524
15. Teng Honghui Xu Shukun, Wang Jiku. Ultrasonication-Assisted Hydrothermal Synthesis of Ultralong TiO₂ Nanotubes // Rare Metal Materials and Engineering. 2014. Vol. 43, № 10. P. 2326–2329.
16. Co-treatment of spent cathode carbon in caustic and acid leaching process under ultrasonic assisted preparation of SiC / J. Yuan, J. Xiao, F. Li, B. Wang, Z. Yao, B. Yu, L. Zhang // Ultrason. Sonochem. 2018. Vol. 41. P. 608–618.
17. ООО «Ультразвуковая техника – ИНЛАБ». URL: <http://www.utinlab.ru/> (дата обращения 20.12.2019).

A. A. Vjuginova

Saint Petersburg Electrotechnical University

A. A. Lbov, Alexander A. Novik, Alexey A. Novik

ООО «INLAB-Ultrasound»

DEVELOPMENT OF ULTRASONIC PROCESSING METHODS FOR CHEMICALLY AGGRESSIVE MEDIUMS UNDER ELEVATED TEMPERATURE AND PRESSURE AND CORRESPONDING POWER ULTRASONIC TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Considers aspects of operating physical principles development and design of power ultrasonic technological equipment intended to work with aggressive mediums under high temperatures and pressure: design features, requirements for acoustic system, peculiarities of measuring transducers and requirements for control system. There is a wide variety of technological processes realized by using of ultrasound energy affecting to liquid medium – all of them are based on cavitation effect in liquids and allow solving emulsification, dispersion, extraction, homogenization, etc. tasks. In some cases, a number of technologies require a combination of ultrasound exposure with high temperature and pressure, using of acids and alkalis. The example of such system, considered in paper, allows processing a highly concentrated alkali solution under high pressure and vacuum conditions with a temperature up to 300 °C.

Ultrasound, ultrasonic equipment, ultrasonic technology, dispersion, deagglomeration, emulsification, extraction, sonochemistry, elevated pressure, elevated temperature