УДК 542.64:534-8

Влияние параметров ультразвуковых колебаний на явления массопереноса через модельные мембраны

Казуб В.Т., Компанцев Д.В., Семёнова Н.Н.

Пятигорский медико-фармацевтический институт, филиал ВолгГМУ

Ключевые слова: ультразвуковые технологии, мощность излучателя, массоперенос, эффективность.

Наряду с развивающимися методами интенсификации различных технологических процессов импульсным электрическим полем [1-4], ультразвуковые методы интенсификации, относящиеся к одному из прогрессивных научных направлений, все шире внедряются в различные отрасли промышленности. Эффективность использования ультразвуковых колебаний в том или ином технологическом процессе во многом определяется пониманием механизмов протекающих процессов, обоснованным выбором способов и устройств для введения таких колебаний в обрабатываемый объект [5-7]. К процессам ультразвуковых технологий в жидкости относятся: очистка, травление, эмульгирование, воздействие ультразвука на электрохимические процессы, диспергирование, экстракция, дегазация, кристаллизация. Доказана эффективность применения ультразвука в технологических процессах, связанных с явлениями переноса, эмульгирования, выпаривания [8]. Ультразвуковые технологии играют существенную роль в фармации. В ряде случаев применение ультразвука позволяет решать технологические задачи, практически не решаемые другими методами. Однако применение ультразвуковых технологий сдерживается в ряде случаев отсутствием данных о зависимости эффективности применения ультразвука от мощности колебаний, их частоты и длительности.

Эффект воздействия ультразвуковыми колебаниями определяется удельной мощностью, поглощённой рассматриваемым объёмом. Попытки

увеличить мощность, отдаваемую излучателем, приводят к тому, что в объёмах, близких к излучателю, начинаются процессы распада молекул (органических, воды) с образованием свободных радикалов и нежелательных химических соединений.

Интенсивность упругих колебаний, получаемая от излучателей в свободном поле, определяется по следующей формуле [9]:

$$I = \frac{1}{2\rho C}\left(\frac{V_0 f}{2rC}\right)^2 \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{2\pi r}{\lambda}+1\right)}}, \qquad (1)$$

где ρ – плотность среды; C – скорость звука в среде; f – частота колебаний излучателя; r – расстояние от излучателя; V_0 – амплитуда объёмной скорости, λ –длина волны в среде.

Зависимость интенсивности от $(V_0 f)^2$ свидетельствует, что для обеспечения одинаковой эффективности ультразвуковых колебаний на разных частотах, создаваемая в рассматриваемом объёме объёмная скорость должна находиться в обратно пропорциональной зависимости от частоты.

В то же время для пьезокерамических излучателей общая отдаваемая акустическая мощность $W_{акк}$ пропорциональна квадрату частоты f и эффективного возбуждающего напряжения $U_{эфф}$. Например, для кварцевой пластины в воде:

$$W_{àê} = I \cdot S = f^2 U_{ýôô}^2 \, S \cdot 10^5, \qquad (2)$$

где S – площадь пьезопластины.

Амплитуда объёмной скорости связана с частотой следующей зависимостью: $V_0 = 2\pi \cdot f \cdot A$, где A – амплитуда смещения.

В то же время поглощение ультразвуковых (как и всяких упругих) колебаний описывается выражением:

$$À_x = A_0 e^{-\alpha \cdot x}, \qquad (3)$$

где A_x - амплитуда упругих колебаний на расстоянии x от источника, A_0 - амплитуда упругих колебаний в точке $x=0$, α - частотно - зависимый коэффициент поглощения.

Коэффициент поглощения для жидкостей до частот 10^8 Гц определяется по следующей формуле [10]: $\alpha = \alpha' \cdot f^2$, где α' – табличная константа для каждого вещества, f – частота колебаний.

Приведённые выше закономерности говорят о том, что даже если добиться одинаковой акустической мощности при излучении на разных частотах в соответствии с формулами 2 и 3, незначительное изменение частоты излучения приведёт к резкому перераспределению поглощаемой мощности между отдельными объёмами жидкости. Увеличение частоты приведёт к тому, что объёмы жидкости, расположенные у излучателя, будут поглощать значительно большую энергию колебаний. Несмотря на постоянное перемешивание жидкости в ультразвуковом поле, поглощённой мощности может оказаться достаточно для проявления дополнительных эффектов, выражающихся в появлении кавитации, образовании свободных радикалов и т.д.

Нами изучены зависимости кинетики массопереноса через мембрану от частоты и мощности ультразвуковых колебаний. Понимание кинетических зависимостей массопереноса через мембраны важно в широком спектре проблем: от ускорения процессов при электродиализе до выработки более эффективной методики введения лекарственных веществ через кожу пациента. Интерес представляет установление зависимостей влияния частоты и удельной мощности ультразвуковых колебаний на кинетику массопереноса одноатомных ионов через модельную мембрану.

Для изучения влияния ультразвуковых колебаний на кинетику массопереноса через мембрану разработана специальная ячейка, позволяющая менять частоту ультразвуковых колебаний в пределах 24 - 275 кГц, с резонансом на 120 кГц (рис. 1). Постоянство отдаваемой звуковой мощности на разных частотах обеспечивалось предварительной калибровкой излучателя.

При измерениях камера 3 заполнялась изучаемой жидкостью с определённой концентрацией вещества, кинетика массопереноса которого изучалась, камера 5 заполнялась дистиллированной водой, после чего на пьезокерамический излучатель 1 подавалось напряжение заданной частоты.

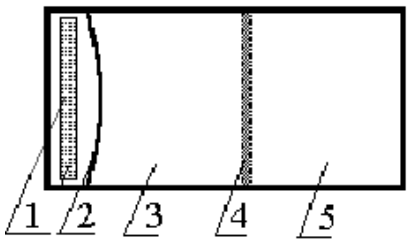

Рис 1. Схема ячейки для изучения кинетики массопереноса через модельную мембрану. 1 – пьезокерамический излучатель, окружённый электронепроводящей средой (веретённое масло), 2 – эластичная перегородка из латексной резины, 3 – камера с изучаемой средой, 4 – модельная мембрана, 5 – камера с водой.

Через определённое время напряжение отключалось, весь объём воды из камеры 5 отбирался для определения концентрации исследуемого вещества, прошедшего через мембрану, затем камеры 3 и 5 промывались дистиллированной водой к следующему опыту.

Если в начальный момент в камере 3 создана концентрация некоего вещества C_0, то масса m исследуемого вещества в ней: $m = C_0 M$, где M – суммарная масса загрузки камеры.

Поток вещества через мембрану описывается уравнением:

$$j = P(C_3 - C_5),$$

где j – поток вещества, P – коэффициент проницаемости мембраны, C_3, C_5 –концентрации вещества в камерах 3 и 5 соответственно.

Поток вещества за элементарный промежуток времени dt: $j = \frac{dm}{Fdt} = \frac{Mdc}{Fdt}$, где F – площадь мембраны.

Масса загрузки жидкостью камер 3 и 5 отличались не более, чем на 1%. В дальнейшем, не снижая точности эксперимента, считаем $M_3 = M_5 = M$.

Тогда получаем следующее уравнение:

$$\frac{MdC_5}{Fdt} = P(C_0 - 2C_5).$$

Отсюда получим зависимость концентрации исследуемого вещества от времени в камере 5 ячейки:

$$\tilde{N}_5 = \frac{1}{2}\tilde{N}_0(1 - e^{-\frac{2PF}{M}t}).$$

Кинетическая зависимость массопереноса: $\ln\frac{C_0}{C_0 - 2C_5} = \frac{2PF}{M}t$.

Данную зависимость можно выразить уравнением вида: $Y = bX$, где роль коэффициента b при X играет множитель $\frac{2PF}{M}$.

Воздерживаясь от численного расчета коэффициента проницаемости мембраны P (что требует обоснования корректности применения понятия «проницаемость мембраны» для модельной мембраны) мы, можем утверждать, что отношение коэффициента b при наложении УЗ колебаний и без них равно отношению коэффициентов диффузии через мембрану при тех же условиях. Обозначим эффективность (коэффициент полезного действия) влияния УЗ колебаний на кинетику массопереноса:

$$\eta = \frac{b_{\tilde{n}\acute{O}\c{C}}}{b_{\acute{a}\aa\c{c}\ \acute{O}\c{C}}} = \frac{P_{\acute{O}\c{C}}}{P_0} = \frac{D_{\acute{O}\c{C}}}{D_0}.$$

В качестве сред нами были использованы: ареспол с глицерином; ареспол с диметилсульфоксидом; карбоксиметилцеллюлоза с диметилсульфоксидом; карбоксиметилцеллюлоза с глицерином; метилцеллюлоза с диметилсульфоксидом; метилцеллюлоза с глицерином.

При постоянстве отдаваемой акустической мощности, зависимость η от частоты показана на рис. 2.

Зависимости 1-3 позволяют рассчитать режимы работы УЗ излучателя так, чтобы в плоскости мембраны интенсивность колебаний была одинакова при различных частотах. Зависимость эффективности влияния УЗ от частоты выглядит следующим образом, рис. 3.

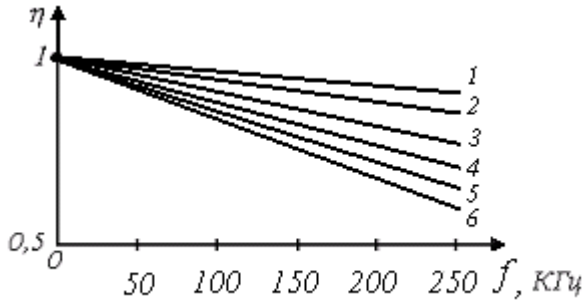

Рис. 2. Зависимость эффективности влияния УЗ колебаний от частоты для различных сред при постоянной отдаваемой акустической мощности.
1- ареспол с глицерином; 2 - ареспол с диметилсульфоксидом; 3 - карбоксиметилцеллюлоза с диметилсульфоксидом; 4 - карбоксиметилцеллюлоза с глицерином; 5 - метилцеллюлоза с диметилсульфоксидом; 6 - метилцеллюлоза с глицерином.

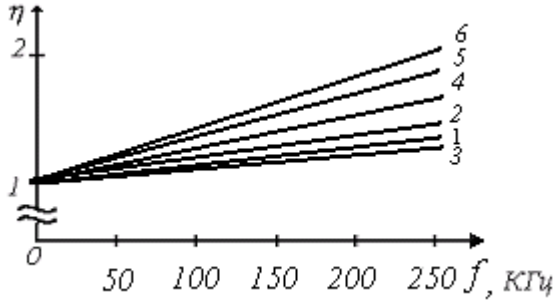

Рис. 3. Зависимость эффективности влияния УЗ от частоты при постоянной интенсивности колебаний в плоскости мембраны (обозначения по рис. 2).

Полученные результаты подтверждают предпосылки о перераспределении поглощённой мощности колебаний с изменением частоты. Постоянство акустической мощности, отдаваемой излучателем на разных частотах, не означает равное энергетическое воздействия на исследуемые объекты.

Литература

1. Рудобашта С.П., Казуб В.Т., Кошкарова А.Г. Вводное экстрагирование сырья под воздействием импульсного электрического поля высокой напряженности. Вестник МГАУ им. В.П. Горячкина. 2016. № 4 (74). - С. 16-21.

2. Рудобашта С.П., Казуб В.Т., Кошкарова А.Г. Исследование кинетики экстрагирования сырья под воздействием импульсного поля высокой напряженности. Вестник МГАУ им. В.П. Горячкина. 2016. № 5 (75). - С. 49-55.

3. Казуб В.Т., Оробинская В.Н., Писаренко О.Н., Коновалов Д.А. Влияние электроразрядной обработки на биологически активные соединения (аскорбиновую кислоту и ликопен). В.Т. Казуб, В.Н. Оробинская, О.Н. Писаренко, Д.А. Коновалов. Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 5-6 (47). - С. 23-26.

4. Казуб В.Т., Кошкарова А.Г. Применение импульсного электрического поля для интенсификации процессов экстрагирования. В сборнике: Пути научно-технического и экономического развития в современных условиях: Проблемы и перспективы. Материалы международной научно-практической конференции. Сер. "Научный вестник", 2015. - С. 334-340.

5. Основы физики и техники ультразвука / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский, Г.И. Эскин.– М.: Высшая шк. 1987. – 361 с.

6. Химия и ультразвук / Под ред. Т. Мейсона.– М.: Мир, 1993, – 238 с.

7. Агранат, Б.А. Ультразвук в порошковой металлургии / Б.А. Агранат, А.П. 8. Гудович, Л.Б. Нежевенко.– М.: Металлургия, 1986. - 276 с.

9. Молчанов Г.И. Ультразвук в фармации. М., Медицина, 1980, 176с.

10.Гершгал Д.А., Фридман В.М. Ультразвуковая технологическая аппаратура. М., Энергия, 1976.