

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЭКСТРАГИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ ВЫСОКОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ

В. Т. Казуб, А. Г. Кошкарлова

Кафедра физики и математики, Пятигорский медико-фармацевтический институт – филиал ГБОУ ВПО «Волгоградский государственный медицинский университет», г. Пятигорск; bukva46@mail.ru

Ключевые слова и фразы: высокая напряженность; импульсное электрическое поле; моделирование; экстрагирование.

Аннотация: Представлены теоретические и экспериментальные исследования процесса экстрагирования биологически активных соединений – флавоноидов из листьев софоры японской импульсным электрическим полем высокой напряженности. При моделировании методом конечных элементов установлено оптимальное отношение фаз «твердое тело – жидкость», равное 1:10. Выявлено соотношение диаметров электродов коаксиальной камеры, при котором исключается развитие разряда вдоль поверхности мокрого изолятора. Исследования кинетики экстрагирования показали, что максимальный выход биологически активных соединений достижим при длительности импульса 0,15...0,2 мкс, что объясняется увеличением глубины проникновения поля в частички сырья. При экстрагировании под воздействием импульсного электрического поля высокой напряженности по сравнению с электроразрядным методом энергетические затраты в 4 раза ниже.

Интенсификация процессов экстракции направлена на увеличение скорости массообмена в системе «твердое тело – жидкость». По этому пути осуществляется поиск и разработка новых методов, в основе которых лежит передача системе «твердое тело – жидкость» вибраций, пульсаций, колебаний различных частот и амплитуд.

Среди методов, обладающих минимумом ступеней преобразования энергии – метод обработки твердых тел, расположенных в жидкости, с помощью электрических разрядов [1]. Данный метод обладает ощутимыми преимуществами перед традиционными, используемыми в фармации, однако примеси металла, эродировавшего с электродов при разряде, могут потребовать дополнительной очистки получаемых экстрактов.

Перспективной, при соответствующей проработке, может стать технология, основанная на воздействии на объект импульсного электрического поля высокой напряженности, которая сводит к минимуму вероятность загрязнения экстракта продуктами электрической эрозии электродов.

В технологии экстрагирования растительного сырья, основанной на силовом воздействии импульсного электрического поля высокой напряженности, основной структурный элемент технологической схемы – источник импульсного напряжения. Производительность и эффективность способа обработки сырья под действием импульсного электрического поля, при использовании в качестве экстрагирующей жидкости воды, во многом будет определяться фронтом и длительностью воздействующего высоковольтного импульса напряжения [2]. Для уменьшения

токов растекания необходимо ограничивать, по возможности, длительность импульса до уровня, сводящего на нет тепловые эффекты, с другой стороны частотная характеристика импульсного поля должна обеспечивать его проникновение вглубь частицы на достаточную глубину. Этим условиям соответствует колоколообразный импульс напряжения (рис. 1), формируемый на электродах экстракционной камеры импульсным высоковольтным источником, на базе импульсного трансформатора [3–4].

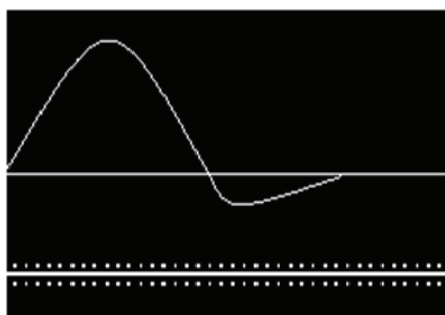


Рис. 1. Осциллограмма импульса напряжения (метки времени 10 нс)

Согласно оценочным расчетам изготовлен источник импульсов со следующими параметрами: диапазон рабочих напряжений до 50 кВ; длительность импульса по основанию $(0,2 \dots 0,5) \cdot 10^{-6}$ с; фронт импульса напряжения $10 \cdot 10^{-8}$ с; частота следования импульсов до 10 Гц.

В качестве сырья для исследований использовали листья софоры японской заводского измельчения, спиртовые экстракты которой известны как эффективное противораковое и ранозаживляющее средство. Сырье из софоры японской содержит рекордное количество флавоноидов, достигающее в растительном сырье до 30 %, поэтому широко применяемое в фармации. Кроме того, имеются данные по водному экстрагированию листьев софоры с применением электрического разряда, которые могут использоваться для сравнения как контрольные.

Из пробы предварительным центрифугированием отделяли твердую фазу, отстаивали, фильтровали и затем по массе сухого остатка после выпаривания жидкой фазы суспензии оценивали выход водорастворимых веществ.

В традиционной методике извлечения целевых компонентов используют растворы этанола, являющегося токсичным веществом. В целях подтверждения целесообразности замены токсичного экстрагента на воду проведены опыты, позволяющие количественно оценить полноту извлечения флавоноидов этанолом различной концентрации и водой.

Использование в качестве экстрагента 60%-го раствора этанола позволяет извлекать экстрактивных веществ из листьев софоры японской в количестве 28,75 %. При проведении водной экстракции с использованием импульсного электрического поля выход флавоноидов составил 24,64 %, что примерно на 4 % меньше, чем дает 60%-й этанол. Однако при этом разница по времени извлечения уменьшается примерно на 165 ч, что делает такой способ извлечения экономически целесообразным.

Для обоснования соотношения «твердое тело – жидкость» и величины межэлектродного промежутка проведено моделирование распределения электрического поля методом конечных элементов [5]. Моделированием установлено, что распределение силовых линий и напряженность электрического поля зависят от соотношения сырья и экстрагента «твердое тело – жидкость», а также от соотношения внутреннего диаметра корпуса экстракционной камеры D и диаметра высоковольтного электрода d .

По мере уменьшения соотношения d/D напряженность поля в объеме камеры падает, что соответствует фундаментальным представлениям о зависимости напряженности поля от величины межэлектродного промежутка. Оптимальным соотношением «твердое тело – жидкость» следует считать соотношение 1:10. При этом реализуется высокая напряженность электрического поля в камере, а относительное уменьшение экстрагирующей жидкости (при традиционном извлечении 1:15)

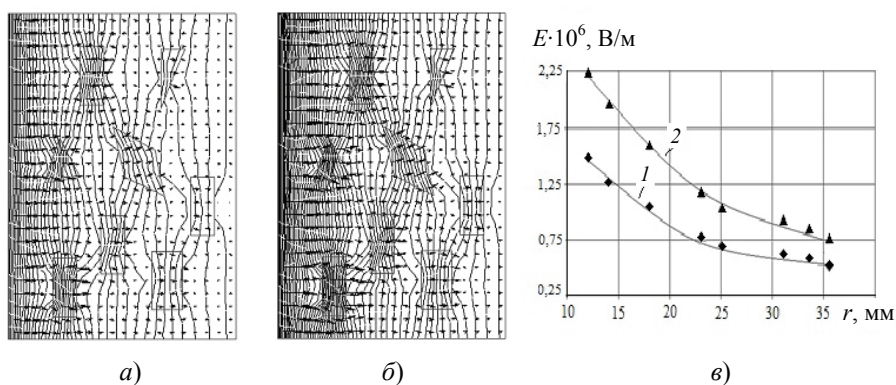


Рис. 2. Картины распределения электрического поля:
a, б – в экстракционной камере; *в* – зависимость напряженности электрического поля E от расстояния r до высоковольтного электрода

позволит повысить экономическую эффективность процесса приготовления сгущенных экстрактов за счет снижения затрат энергии на испарение экстрагента.

На рисунке 2, *a, б* показаны модельные картины распределения электрического поля в экстракционной камере, полученные при следующих параметрах: диэлектрические проницаемости частицы и экстрагента соответственно 7 и 81; внутренний диаметр камеры 80 мм; диаметр высоковольтного электрода 7 мм; соотношение «сырье–экстрагент» 1:10; разность потенциалов 20 и 30 кВ на рис. 2, *a, б* соответственно. На рисунке 2, *в* показано изменение напряженности электрического поля в объеме камеры по мере удаления от высоковольтного электрода (кривая 1 – амплитуда импульса 20 кВ; 2 – 30 кВ). Результаты моделирования в условиях, приближенных к параметрам экстрагирования, позволяют дополнить физические представления о процессах, реализуемых в экстракционных аппаратах под воздействием поля высокой напряженности.

В экстракционной камере существует граница раздела «вода–воздух», по которой возможен электрический пробой (рис. 3). Напряженность электрического поля, при которой наступает пробой по поверхности воды на импульсном напряжении, оценивается величиной $(2,2 \dots 2,5) \cdot 10^6$ В/м и зависит от проводимости воды.

В таком случае, учитывая данные о проводимости суспензии, обработанной электрическим полем, напряжение перекрытия можно принять равным $2,2 \cdot 10^6$ В/м. Такая напряженность электрического поля, как $2,25 \cdot 10^6$ В/м, реализуется при импульсах напряжения амплитудой 30 кВ на расстоянии от высоковольтного электрода 10...12 мм (см. рис. 2, *в*).

Для исключения даже частичных (незавершенных) разрядов по границе раздела рекомендуется напряжение импульса величиной 25 кВ.

Зазор между электродом и корпусом камеры коаксиального исполнения должен обеспечивать максимальную напряженность электрического

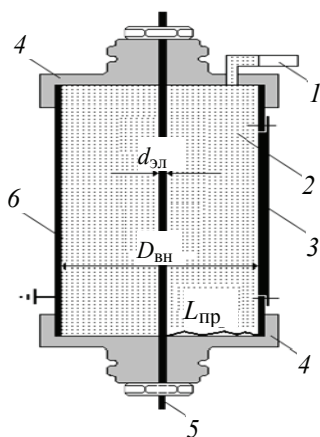


Рис. 3. Конструкция экстракционной камеры:
 1 – мерное стекло; 2 – смесь сырья с водой;
 3 – крышка камеры; 4 – основание;
 5 – высоковольтный электрод;
 6 – заземленный корпус

поля и исключать возможность развития электрического разряда на границе раздела «воздух – жидкость» $L_{\text{пр}}$ в экстракционной камере (см. рис. 3).

Экспериментальными исследованиями определено соотношение внутреннего диаметра камеры и высоковольтного электрода, при котором исключается для определенных размеров камеры развитие разряда по границе раздела «воздух – жидкость» $L_{\text{пр}}$

$$\frac{D_{\text{вн}} \left(\frac{U_{\text{пр.смеси}}}{U_{\text{пов}}} - 1 \right)}{2} \leq d_{\text{эл}} \leq \frac{D_{\text{вн}} \left(\frac{U_{\text{пр.смеси}}}{U_{\text{пов}}} - 1 \right)}{1,6},$$

где $d_{\text{эл}}$ – диаметр высоковольтного электрода, мм; $D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр камеры, мм; $U_{\text{пр.смеси}}$ – пробивное напряжение воздушного промежутка, В; $U_{\text{пов}}$ – напряжение пробоя по границе раздела $L_{\text{пр}}$ «изолятор – жидкость», В (см. рис. 3).

Экстрагируемое сырье (измельченные листья софоры японской) в определенном отношении с экстрагентом (водой), помещали в экстракционную камеру объемом 500 мл и проводили серию опытов, варьируя массовое отношение загружаемых фаз при постоянстве других технологических параметров. Получена зависимость выхода целевого продукта от длительности импульса электрического поля.

Оптимальная величина длительности импульса электрического поля, при которой глубина проникновения поля соизмерима с размерами частиц обрабатываемого сырья, находится в диапазоне 0,15...0,2 мкс. При этом количество извлеченных веществ в процентном отношении возрастает с 12 % до 27...27,5 %, по отношению к импульсу длительностью 0,5 мкс.

Проведено сравнение результатов исследований по извлечению флавоноидов из софоры японской при использовании в качестве интенсифицирующего фактора электрического разряда [6]. При экстрагировании с применением электрического разряда выход суммы флавоноидов после обработки достигает максимума (около 30 %) при разрядной емкости $C = 0,6$ мкФ, межэлектродном промежутке $l = 1,0$ мм и амплитуде импульса напряжения 25 кВ, в то время как при экстрагировании под воздействием импульсного поля высокой напряженности, при сопоставимом времени извлечения и напряжении импульса, равном 25 кВ, выход соответствует 27 % в одной серии, но в этом случае энергетические затраты в 4 раза ниже.

Определение подлинности экстрактов является одним из важнейших этапов их стандартизации и нормирования качества. Исследование качественного состава флавоноидов проводили с использованием тонкослойной хроматографии по известной методике [7]. Подлинность водного экстракта свидетельствуют о том, что флавоноиды, извлеченные из сырья под воздействием физических явлений в экстракционной камере, не разрушаются, а сохраняются в нативном виде.

Результаты исследования позволили создать первую четырехэлектродную установку для экстрагирования лекарственного сырья с применением импульсного электрического поля высокой напряженности.

Список литературы

1. Семкин, Б. В. Основы электроимпульсного разрушения материалов / Б. В. Семкин, А. Ф. Усов, В. И. Курец. – Л. : Наука, 1988. – 277 с.
2. Кудимов, Ю. Н. Электроразрядные процессы в жидкости и кинетика экстрагирования биологически активных компонентов. Часть 2. Эффективная электропроводность экстрагента / Ю. Н. Кудимов, В. Т. Казуб, Н. В. Криворотов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 2. – С. 253 – 263.

3. Вдовин, С. С. Проектирование импульсных трансформаторов / С. С. Вдовин. – Л. : Энергия, Ленингр. отд-ние, 1971. – 147 с.
 4. Моругин, Л. А. Наносекундная импульсная техника / Л. А. Моругин, Г. В. Глебович. – М. : Советское радио, 1964. – 624 с.
 5. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер, В. М. Картелишвили, Н. В. Баничук. – М. : Мир, 1984. – 428 с.
 6. Казуб, В. Т. Использование электроразрядной технологии для извлечения биологически активных компонентов / В. Т. Казуб, А. Г. Кошкарова // Пути развития науки и образования в современных условиях : материалы Междунар. симпозиума, п. Лоо (г. Сочи), 21 – 24 февр. 2013 г. / АНО «Сев.-Кавказ. акад. инновац. технологий в образовании и науке». – Пятигорск, 2013. – С. 202 – 206.
 7. Химический анализ лекарственных растений : учеб. пособие / под ред. Н. И. Гринкевич, Л. Н. Сафронич. – М. : Высшая школа, 1983. – 176 с.
-

Extraction Process by High Intensity Pulsed Electric Fields

V. T. Kazub, A. G. Koshkarova

*Department of Physics and Mathematics,
Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute – Affiliate of Volgograd
State Medical University, Pyatigorsk; bukva46@mail.ru*

Key words and phrases: extraction; high intensity; modeling; pulsed electric field.

Abstract: The paper describes theoretical and experimental studies of the process of extraction of bioactive compounds – flavonoids – from the *Sophora japonica* leaves by high intensity pulsed electric fields. Application of finite element method in the simulation enabled to produce an optimal phase ratio “solid body – liquid” equal to 1:10. We calculated the diameter ratio of the coaxial electrode chamber, which prevents the discharge propagation along the surface of wet insulator. The study of extraction kinetics showed that the maximum output of biologically active compounds is achievable with pulse duration of 0.15...0.2 ms, which is explained by an increase in depth of field penetration in the particles of raw materials. The extraction under the influence of high intensity pulsed electric field compared to electric discharge method saves energy costs by 4 times.

References

1. Semkin B.V., Usov A.F., Kurets V.I. *Osnovy elektroimpul'snogo razrusheniya materialov* (Fundamentals of Electro destruction of materials), Leningrad: Nauka, 1988, 277 p.
2. Kudimov Yu. N., Kazub V. T., Krivorotov N. V. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2002, vol. 8, no. 2, pp. 253-263.
3. Vdovin S.S. *Proektirovanie impul'snykh transformatorov* (Design of pulse transformers), Leningrad: Energiya, Leningradskoe otdelenie, 1971, 147 p.
4. Morugin L.A., Glebovich G.V. *Nanosekundnaya impul'snaya tekhnika* (Nanosecond pulse technique), Moscow: Sovetskoe radio, 1964, 624 p.
5. Gallager R., Kartvelishvili V.M., Banichuk N.V. *Metod konechnykh elementov. Osnovy* (The Finite Element Method. Basics), Moscow: Mir, 1984, 428 p.

6. Kazub V.T., Koshkarova A.G., in *Puti razvitiya nauki i obrazovaniya v sovremennykh usloviyakh* (Ways of development of science and education in modern conditions), Proceedings of the International Symposium, Loo (Sochi), 21-24 February 2013, Pyatigorsk, 2013, pp. 202-206.

7. Grinkevich N.I., Safronich L.N. (Eds.), Ladygina E.Ya., Otryashenkova V.E. *Khimicheskii analiz lekarstvennykh rastenii* (Chemical analysis of medicinal plants), Moscow: Vysshaya shkola, 1983, 176 p.

Intensivierung der Prozesse der Extrahierung vom impulsartigen elektrischen Feld der hohen Gespanntheit

Zusammenfassung: Es sind die theoretischen und experimentalen Forschungen des Prozesses der Extrahierung der aktiven Vereinigungen – der Flaonoiden aus den Sophora japonica Blättern vom elektrischen Impulsfeld der hohen Gespanntheit angeführt. Bei der Modellierung von der Methode der endlichen Elemente ist die optimale Beziehung der Phasen T/DZ gleich 1:10 bestimmt. Es ist das Verhältnis der Durchmesser der Elektroden der Koaxialkamera enthüllt, bei dem die Entwicklung der Kategorie entlang der Oberfläche des nassen Isolators ausgeschlossen wird. Die Forschungen der Kinetik der Extrahierung haben vorgeführt, dass es der maximale Ausgang der aktiven Vereinigungen biologisch ist ist bei der Impulsdauer 0,15...0,2 mks erreichbar, was sich mit der Vergrößerung der Tiefe der Durchdringung des Feldes in die Teilchen des Rohstoffs klärt. bei der Extrahierung unter der Einwirkung des elektrischen Impulsfeldes der hohen Gespanntheit im Vergleich zur Elektroentladungsmethode die energetischen Aufwände in 4 Male ist es niedriger.

Intensification des processus de l'extraction par un champ électrique impulsionnel de la haute tension

Résumé: Sont présentées les études théoriques et expérimentales de l'étude du processus de l'extraction des combinaisons biologiques actives – Flavonoïdes – par un champ électrique impulsionnel de la haute tension. Est déduite la relation des diamètres des électrodes de la chambre coaxiale lors de laquelle est exclu le développement de la décharge le long de la surface éde l'isolateur trempé. Les dépenses énergétiques sont plus grandes de 4 fois lors de l'extraction sous l'action du champ électrique impulsionnel de la haute tension en comparaison avec la méthode de la décharge électrique.

Авторы: *Казуб Валерий Тимофеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и математики; *Кошкарова Анна Геннадьевна* – преподаватель кафедры физики и математики, Пятигорский медико-фармацевтический институт – филиал ГБОУ ВПО «Волгоградский государственный медицинский университет», г. Пятигорск.

Рецензент: *Газаров Руслан Арамович* – доктор технических наук, профессор, президент АНО «Северо-Кавказская академия инновационных технологий в образовании и науке», г. Пятигорск.