

УДК 541.136.136.88

ЛИТИЙ-ФТОРУГЛЕРОДНЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА ДЛЯ ГАСТРОСКОПИИ

С. А. Фатеев^{1✉}, И. А. Пуцылов¹, С. Е. Смирнов¹, Д. В. Фомин²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет “МЭИ”»
111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., 14

²АО Научно-исследовательский и проектно-технологический институт электроугольных изделий
142455, Россия, Московская обл., Электроугли, пер. Горки, 1

✉ E-mail: serfat@list.ru

Поступила в редакцию 18.09.17 г.

Разработаны элементы электрохимической системы литий-фторированный углерод для капсульной эндоскопии и видеокapsул отечественной разработки. Показаны их значительные преимущества перед традиционными серебряно-цинковыми источниками тока для этих изделий, как по длительности работы, так и по энергетическим показателям. Исследованы разрядные характеристики, надёжность и безотказность в работе с макетами гастрокапсул отечественного производства.

Ключевые слова: гастрокапсула, литий-фторуглеродный элемент.

LITHIUM-LUOROCARBON POWER SOURCE FOR GASTROSCOPY

Sergey A. Fateev^{1✉}, ORCID: 0000-0003-2553-9910, serfat@list.ru
Ivan A. Putylov¹, ORCID: 0000-0002-4905-9914, putylov@yandex.ru
Sergey E. Smirnov¹, ORCID: 0000-0002-5493-4197, smirnovsy@mail.ru
Denis V. Fomin², ORCID: 0000-0002-5392-3365, fomin-denis@bk.ru

¹National Research University “Moscow Power Engineering Institute”
14, Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russia

²Research and Design Institute of Electrocoal Products
1, Gorky Lane, Elektrougli, Moscow Region, 142455, Russia

Received 18.09.17

Elements of electrochemical system lithium-fluorinated carbon for capsular endoscopy and video-capsules of domestic development are developed. Their significant advantages over traditional silver-zinc current sources for these products are shown both in terms of operating time and energy parameters. The discharge characteristics, reliability and trouble-free operation with mock-ups of domestic gastro-capsules are investigated.

Key words: gastrocapsule, lithium-fluorocarbon cell.

DOI: 10.18500/1608-4039-2017-17-3-135-142

ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс в последнее время способствует проникновению достижений науки и техники, в частности электрохимии, в различные области здравоохранения. Современная медицина уделяет значительное внимание использованию средств, необходимых для поддержания жизнедеятельности нашего организма. Эта тенденция

повышает спрос на медицинские приборы с автономным питанием [1].

Литиевые химические источники тока (ХИТ) удерживают лидирующие позиции по объёму продаж и интересу со стороны как потребителей, так и разработчиков [2, 3]. Так, например, в области имплантируемых электрокардиостимуляторов литиевые источники тока занимают прочную позицию уже на протяжении более 40 лет [4].

В последние годы в рамках программы по импортозамещению начались разработки и исследования капсульного эндоскопического медицинского оборудования в Российской Федерации. Капсульная эндоскопия – это инновационное диагностическое медицинское оборудование, предназначенное для исследования желудочно-кишечного тракта. До недавнего времени тонкая кишка оставалась *terra incognita* на карте желудочно-кишечного тракта. Трудности её обследования были обусловлены анатомическими (значимая удалённость от естественных отверстий, большая протяжённость) и физиологическими (активная перистальтика) причинами. Исключение составляли терминальный отдел подвздошной кишки, ретроградно обследуемый в процессе илеоколоноскопии, и доступные только для специальных push-эндоскопов начальные 90–150 см тощей кишки [5–7]. Длительное время в медицинский диагностический комплекс обследования тонкой кишки входило её рентгенологическое контрастное исследование с сульфатом бария, которое в полной мере не могло удовлетворить клиницистов. Несмотря на то что рентгенологическое исследование способно обнаружить стриктуры и опухолевые поражения тонкой кишки, его чувствительность в диагностике кровотечений составляла не более 5%. Рентгенологически невозможно получить детальное изображение слизистой оболочки, особенно плоских сосудистых поражений (ангиодисплазий), которые являются одной из наиболее частых причин «скрытых» кровотечений из органов желудочно-кишечного тракта [8]. Возможности других методов лучевой диагностики (компьютерной томографии, магнитно-резонансной томографии) также ограничены в предоставлении полной информации о состоянии стенки тонкой кишки.

Внедрённый в клиническую практику на рубеже столетий и постоянно развивающийся в дальнейшем медицинский диагностический комплекс на основе видеокапсульной эндоскопии (ВКЭ) открыл но-

вую главу в исследовании тонкой кишки [8]. Именно эта революционная техника впервые позволила получить высококачественное эндоскопическое изображение всей тонкой кишки без выполнения хирургической интервенции и лучевого воздействия. Использование видеокапсулы в ежедневной клинической практике установило различные группы заболеваний тонкой кишки (воспалительные, сосудистые, неопластические, ятрогенные) и стимулировало развитие и внедрение других диагностических и терапевтических методов, таких как двухбаллонная энтероскопия, магнитно-резонансная и компьютерно-томографическая энтерография.

Видеокапсула представляет собой одноразовое устройство (рис. 1), которое проглатывают, и далее оно продвигается по желудочно-кишечному тракту, осуществляя видеосъёмку изображения слизистой оболочки. Для проведения исследования система капсульной эндоскопии включает в себя, помимо эндокапсулы, записывающее устройство с присоединяемыми внешними антеннами, устройство просмотра в реальном времени и настроенную рабочую станцию с программным обеспечением для просмотра и интерпретации изображений.



Рис. 1. Внешний вид гастрокапсулы

Fig. 1. Appearance of gastro capsule

Принцип работы капсулы заключается в передаче высококачественных цифровых снимков тонкой кишки на записывающее

устройство, располагающееся на теле пациента в течение всего исследования.

Капсула имеет следующие характеристики: выполняет съёмку с частотой 2 кадра/с, в течение 8 ч работы передаёт около 55000 видеоизображений, минимальный размер детализации – около 0.1 мм, при максимальном восьмикратном увеличении глубина осмотра составляет от 1 до 30 мм, а угол обзора – 140° [8].

Главным компонентом капсульной эндоскопии является миниатюрная эндоскопическая видеокapsула (капсульный эндоскоп, состоящий из оболочки, миниатюрной видеокамеры, источников света, источника питания и передатчика) (рис. 2). Используемый источник тока должен обеспечивать наилучшее качество передаваемых фотографий с увеличенной частотой кадров в секунду для получения максимальной информации. Двигаясь естественным образом по желудочно-кишечному тракту, эндоскопическая видеокapsула с определённой частотой производит съёмку и передаёт полученные изображения на специальное устройство (ресивер).

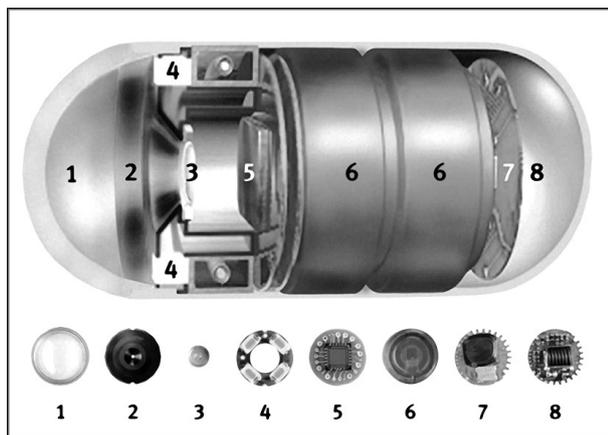


Рис. 2. Схема эндоскопической видеокapsулы: 1 – оптический купол эндоскопической видеокapsулы, 2 – держатель линзы, 3 – линза, 4 – светодиоды (источники света), 5 – оптический сенсор, 6 – химические источники тока (ХИТ), 7 – передатчик, 8 – антенна

Fig. 2. Diagram of endoscopic gastrocapsules: 1 – Optical dome of the endoscopic video capsule; 2 – Lens holder; 3 – Lens; 4 – Light-emitting diodes (light sources); 5 – Optical sensor; 6 – Chemical current sources (HIT); 7 – Transmitter; 8 – Antenna

Первые данные исследований человека с помощью капсульной эндоскопии были получены в 2001 г. в США. На данный момент в мире основными производителями видеокapsульной эндоскопии являются: MiroCam (Южная Корея), PillCam (Израиль), OMOM (КНР) и EndoCapsule (Япония).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В нашей стране на многих предприятиях медицинской техники ведутся разработки диагностических комплексов на основе гастрокапсулы. Если с электронным блоком, видеокамерой, передатчиком вопрос удалось решить довольно быстро, то с источником питания возникли проблемы. Выбранные по массогабаритным параметрам источники тока R380 (SR936W) 80 мА·ч (2 штуки, соединённые последовательно) совершенно не удовлетворяют разработчиков. Даже при частоте съёмки один раз в секунду источники тока быстро разряжаются и уже через 4 ч работы получаются некачественные тёмные снимки. А для качественного функционирования гастрокапсулы необходимо осуществлять 2 кадра в секунду на протяжении минимум 8 ч непрерывной работы. При этом режим работы источника тока осуществляется по весьма жёсткой циклограмме нагрузки (рис. 3).

ХИТ должен обеспечивать непрерывную работу гастрокапсулы не менее 8 ч при температуре 35–38°C в следующем режиме:

- гастрокапсула осуществляет видеосъёмку не менее 2 раз в секунду;
- далее возникает импульс длиной 35–45 мс при токе потребления ~45 мА;
- затем идёт передача данных в течение 150–250 мс при токе потребления 12–15 мА;
- далее следует пауза в работе гастрокапсулы до следующей видеосъёмки при токе потребления 0.3 мА. Исходя из приведённой циклограммы за 8 ч непрерывной работы расход ёмкости составит всего 90–95 мА·ч.

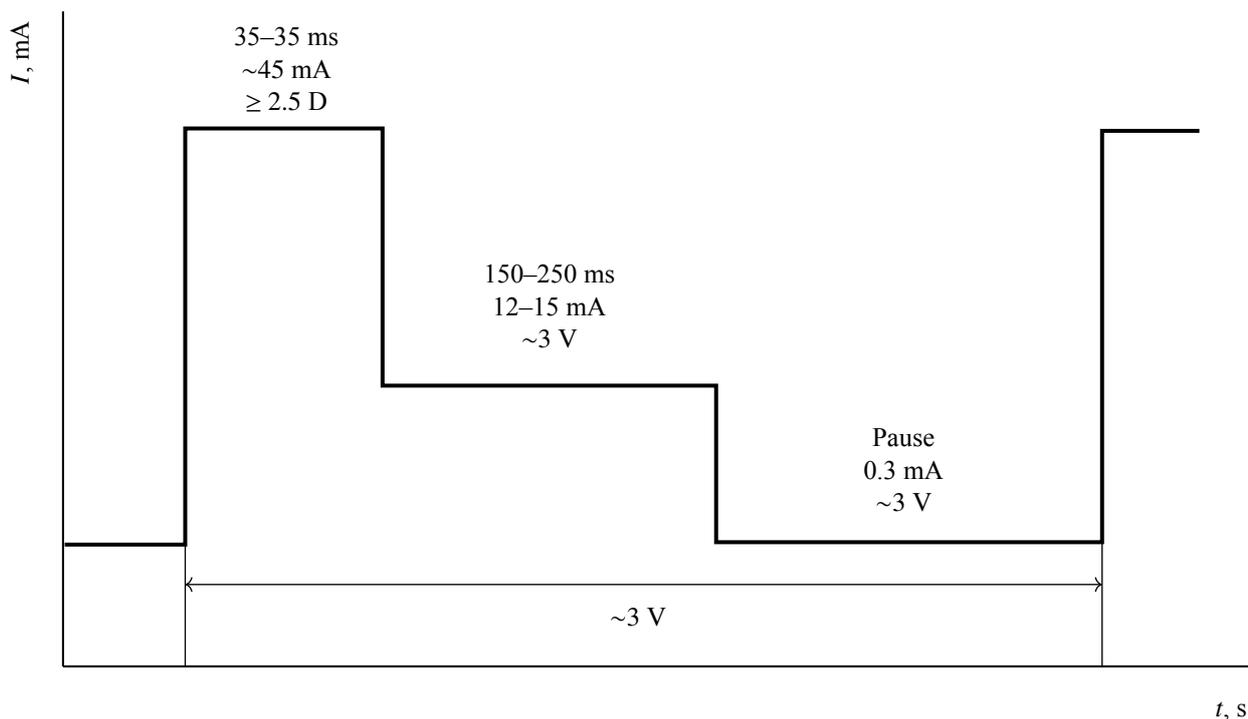


Рис. 3. График нагрузки ХИТ в гастрокapsule

Fig. 3. Schedule of HIT load in gastro capsule

В связи с вышеизложенным выбранные из продажных ХИТ серебряно-цинковые источники тока не удовлетворяют разработчиков гастрокapsулы. Возникла необходимость разработать и изготовить один 3-вольтовый источник тока взамен двух источников SR936W напряжением 1.5 В. Исходя из размеров разработанной гастрокapsулы, габариты ХИТ должны быть следующие:

- диаметр – от 7 до 9.5 мм,
- высота – от 8 до 9 мм.

Нами было предложено использовать литий-фторуглеродную электрохимическую систему. В ряду известных в настоящее время источников тока литий-фторуглеродные (Li-CF_x) системы обладают явным преимуществом с точки зрения их надёжности и безопасности. Катод, выполненный на основе фторированного углерода, является достаточно стабильным веществом, термодеструкция которого происходит при температурах выше 350°C . Высокая гидрофобность

фторированного углерода является его преимуществом при применении в литиевых источниках тока. Образующийся по мере разряда аморфный углерод в структуре катода повышает электрическую проводимость электрода, что способствует поддержанию плато на разрядной кривой. В качестве исходных углеродных материалов для получения фторированного углерода применяют нефтяной кокс, углеродные ткани на основе гидратцеллюлозы, оксиды графита, специально обработанные каменноугольные пекки. Наиболее освоенными в промышленности являются материалы из графитированного нефтяного кокса и углеродных тканей [9]. Нами для изготовления катода использовался волокнистый фторуглеродный материал ИТГ-124, изготовленный в НИИЭИ (г. Электроугли, Россия) с содержанием фтора 60 мас. %.

Для предварительных испытаний с целью выбора состава катода и материала токосъёма испытывались макеты источников

тока. Макет источника тока состоит из фторуглеродного катода, запаянного в полипропиленовый сепаратор, и литиевого анода свёрнутых в рулон общим диаметром 9 мм и помещённых в стеклянный бюкс с неводным электролитом. Катод состоит из фторированного углерода (80–90%) марки ИТГ-124 с добавкой технического углерода (7–15%) и связующего Ф-4Д (3–5%). Катод напрессовывали на токосъём из чистого алюминия, алюминиевой фольги с покрытием из карбида титана, титановой фольги различной толщины. Общая толщина катода составляла $0.45 \div 0.50$ мм (рис. 4). Масса активной массы катода составляла ~ 0.40 г. Ширина катода 7 мм, длина 75 мм. Катод запаивали в полипропиленовый сепаратор ПОРП-А1 толщиной 20 мкм. Анод изготавливали из литиевой фольги толщиной 0.2 мм. Ширина анода 7 мм, длина 90 мм. Токосъём анода – плетёная нержавеющая сетка толщиной 30 мкм, шириной 6 мм. Катод и анод на специально изготовленной скруточной машине скручены в рулон с наружным слоем литиевого анода и токоотводами в противоположные стороны. Габаритные размеры реакторной части 9×8 мм. Скрутку реакторной части помещали в стеклянный цилиндр с внутренним диаметром 9 мм. Электролит представляет собой 1-молярный раствор тетрафторбората лития в смеси апротонных растворителей пропиленкарбоната (80%) и диметоксиэтана (20%). Содержание влаги в электролите менее 0.01%.

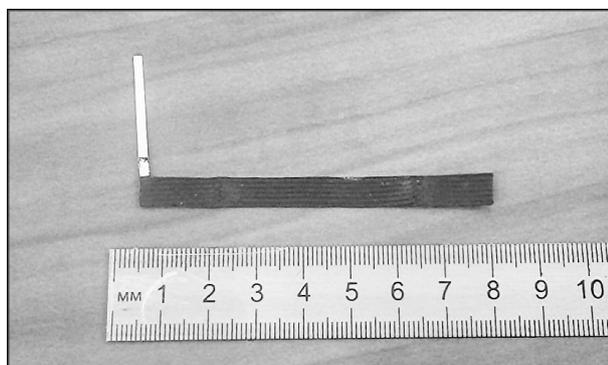


Рис. 4. Фторуглеродный катод

Fig. 4. Fluorocarbon cathode

Собранный макет ХИТ после контроля НРЦ и тока КЗ помещали в термостат с температурой 37°C и проводили непрерывный разряд источника тока на имитатор нагрузки в течение 8 ч с фиксацией мигания светодиодов и контролем минимального значения напряжения в импульсе с помощью компьютеризированного потенциостата ИРС-ProM «НТФ Вольта», г. С.-Петербург, Россия). После завершения испытаний на имитаторе макет ХИТ разряжали на постоянное сопротивление 0.5 КОм (ток разряда $\sim 5 \text{ мА}$) для контроля оставшейся ёмкости. Предварительно были испытаны на имитаторе серебряно-цинковые элементы SR 9365 W (2 шт. в последовательном соединении) при 37°C . В начальный момент мигания нижнее напряжение составляло 2.58 В. Уже через 30 мин напряжение упало до 2.0 В и мигание на имитаторе прекратилось. На рис. 5, а, б представлены разрядные кривые макетов литий-фторуглеродных ХИТ с разными вариантами материалов токосъёмов катодов. Видно, что реализуемая ёмкость макетов ХИТ составляет $150\text{--}170 \text{ мА}\cdot\text{ч}$. При коэффициенте использования 75% (в режиме работы имитатора) реализуемая ёмкость составит $112 \text{ мА}\cdot\text{ч}$. Нижнее разрядное напряжение в импульсе на протяжении 8 часов разряда менялось от 2.54 до 2.41 В. Следует отметить, что качественные снимки получаются при минимальном разрядном напряжении не ниже 2.4 В. Как следует из результатов предварительных испытаний макетов ХИТ, все испытанные варианты в заданных габаритах обеспечивают интенсивное мигание светодиодов на имитаторе нагрузки в течение 8 ч непрерывной работы (табл. 1). Остаточная ёмкость макета после 8 ч работы на имитаторе составляет в среднем $60 \text{ мА}\cdot\text{ч}$, что вполне соответствует требованию ТЗ.

Исходя из выбранных параметров реакторной части макета были изготовлены источники тока в корпусах из нержавеющей стали со следующими габаритами: диаметр 9.6 мм, высота 9 мм (рис. 6). Корпус имеет отрицательную полярность. В крышке ис-

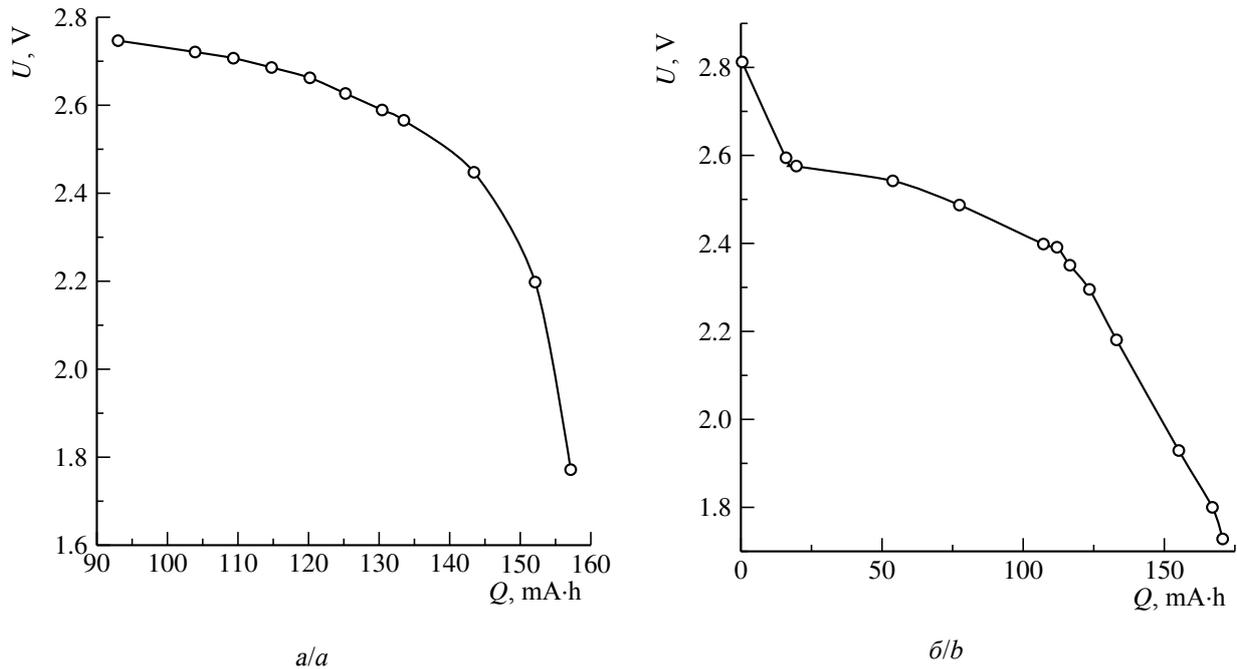


Рис. 5. Разрядные кривые макетов ХИТ с фторуглеродным катодом после 8 ч работы на имитаторе нагрузки и отбора 93 мА·ч. Нагрузка 0.5 КОм, 37°С. Состава катода: CF – 90%, С – 7%, Ф-4Д – 3%: *a* – макет М1, токосъём из алюминиевой фольги с покрытием из карбида титана; *б* – макет М2, токосъём из просечной титановой сетки с покрытием коллоидным графитом

Fig. 5. The discharge curve of the HIT with a fluorocarbon cathode after 8 hours of operation on a load simulator and a sampling of 93 mA·h. Load 0.5 kOhm, 37°C. Composition of the cathode: CF – 90%, C – 7%, F-4D – 3%: *a* – M1 layout on a current collector made of Al foil with a coating of titanium carbide; *b* – M2 layout on a current-collecting bridge of a titanium grid with colloidal graphite coating

точника тока расположен гермовывод положительного электрода. Гермовывод (изолятор) ИСП-0.5М аналогичен изолятору для источников тока в электрокардиостимуляторах [10]. С партией готовых элементов были проведены испытания макетов гастрокapsулы. ХИТ подключали к макету капсулы и всю сборку помещали в термо-

камеру, замеры проводились при температуре +36–+38°С. Макет капсулы работал от ХИТ до полного сохранения своей работоспособности. Съёмку производили два раза в секунду (точнее с периодом ≈560 мс) с разрешением 640 × 480 точек и сохраняли снимки во внешнем приёмнике на флеш-память.

Таблица 1 / Table 1

Параметры макетов ХИТ и результаты предварительных испытаний
Parameters of layouts power sources and the results of preliminary tests

№ макета ХИТ	НРЦ, В	Ток К.З., мА	Состав катода CF-С-Ф-4Д, %	Минимальное напряжение на имитаторе, В, после 8 ч работы	Материал токосъёма катода	Суммарная ёмкость, мА·ч
М1	3.20	140	90–7–3	2.415	Al(TiC)	157
М2	3.30	160	90–7–3	2.541	Ti	172
М3	3.55	180	80–15–5	2.469	Ti	130

Во время испытаний фиксировали напряжение на капсуле в момент съёмки (U_0), передачи данных в приёмник (U_1) и паузе между съёмками (U_2). Результаты измерений представлены в табл. 2.



Рис.6. Внешний вид источника тока для гастрокапсулы

Fig. 6. Appearance of the power source for gastrocapsules

Ниже приведены варианты изготовления катодов для этих ХИТ:

1) CF – 90%, C – 7%, Ф4Д – 3%, токосъём Ti;

2) CF – 70%, MnO₂ – 20%, C – 7%, Ф4Д – 3%, токосъём Al(TiC);

3) CF – 90%, C – 7%, Ф4Д – 3%, токосъём Al(TiC);

4) CF – 80%, C – 15%, Ф4Д – 5%, токосъём Ti.

Таблица 2 / Table 2

Параметры готовых ХИТ с макетами гастрокапсул
Parameters of finished power sources with layouts of gastrocapsules

№ ХИТ	U_0 , В	U_1 , В	U_2 , В
1	2.55	2.73	2.83
2	2.68	2.85	3.05
3	2.36	2.52	2.71
4	2.42	2.66	2.8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанные и изготовленные для испытаний макетов источники тока обеспечивают работу капсулы в течение 8 ч при частоте вспышек 2 раза в секунду и разрешении 640×480 точек, что полностью соответствует требованиям ТЗ. После окончательной доработки конструкции самой гастрокапсулы (монтаж и коммутация предлагаемого источника тока во внутреннем объёме) новые источники тока обеспечат её непрерывную и качественную работу в течение требуемого времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нижниковский Е. А. Современные электрохимические источники тока. М.: Радиотехника. 2015. 296 с.
2. Кедренский И. А., Дмитренко В. Е., Грудянов И. И. Литиевые источники тока. М.: Энергоатомиздат. 1992, 240 с.
3. Химические источники тока: справочник / под ред. Н. В. Коровина, А. М. Скундина М.: Изд-во Моск. энерг. ин-та, 2003. 740 с.
4. Фатеев С. А. Современные источники тока для кардиоэлектроники // Электрохим. энергетика. 2011. Т. 11, № 4. С. 223–228.
5. Gay G. J., Delmotte J. S. Enteroscopy in small intestinal inflammatory diseases // Gastrointest Endosc Clin N Am. 1999. Vol. 9. P. 115–123.
6. Perez-Cuadrado E., Macenelle R., Iglesias J., Fabra R. Lamas D. Usefulness of oral video push

- enteroscopy in Crohn's disease // Endoscopy. 1997. Vol. 29. P. 745–747.

7. Liangpunsakul S., Maglinte D. D., Rex D. K. Comparison of wireless capsule endoscopy and conventional radiologic methods in the diagnosis of small bowel disease // Gastrointest Endosc Clin N Am. 2004. Vol. 14. P. 43–50.

8. Iddan G., Meron G., Glukhovsky A., Swain P. Wireless capsule endoscopy // Nature. 2000. Vol. 405. P. 417.

9. Фалков А. С. Применение углерода в химических источниках тока // Автономная энергетика (НПП «Квант»). 2001. № 12. С. 13–44.

10. Фатеев С. А., Рынсков Е. В., Ясюкевич Д. О. Источники тока для имплантируемых медицинских приборов // Вестн. РАЕН. 2007. Т. 7, № 3. С. 33–36.

REFERENCES

1. Nizhnikovskii E. A. *Sovremennye ehlektrokhimicheskie istochniki toka* [Modern electrochemical power sources]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015. 296 p. (in Russian).
2. Kedrenskij I. A., Dmitrenko V. E., Grudyanov I. I. *Litievye istochniki toka* [Lithium power sources]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992. 240 p. (in Russian).
3. *Himicheskie istochniki toka. Spravochnik pod red. N. V. Korovina, A. M. Skundina* [Chemical power sources. Ed. by N. V. Korovina, A. M. Skundina]. Moscow, Iz-vo Moskovskogo Energeticheskogo Instituta, 2003. 740 p. (in Russian).
4. Fateev S. A. *Sovremennye istochniki toka dlya kardioehletroniki* [The Modern power sources for cardioelectronic]. *Elektrokhimicheskaya energetika [Electrochemical energetics]*, 2011, vol. 11, no. 4, pp. 223–228 (in Russian).
5. Gay G. J., Delmotte J. S. Enteroscopy in small intestinal inflammatory diseases. *Gastrointest Endosc Clin N Am.*, 1999, vol. 9, pp. 115–123.
6. Perez-Cuadrado E., Macenelle R., Iglesias J. Usefulness of oral video push enteroscopy in Crohn's disease. *Endoscopy*, 1997, vol. 29, pp. 745–747.
7. Liangpunsakul S., Maglinte D. D., Rex D. K. Comparison of wireless capsule endoscopy and conventional radiologic methods in the diagnosis of small bowel disease. *Gastrointest Endosc Clin N Am.*, 2004, vol. 14, pp. 43–50.
8. Iddan G., Meron G., Glukhovskiy A., Swain P. Wireless capsule endoscopy. *Nature*, 2000, vol. 405, pp. 417.
9. Fialkov A. S. *Primenenie ugleroda v khimicheskikh istochnikah toka* [Carbon use in chemical sources of current]. *Avtonomnaya Ehnergetika [Autonomous Energy]*, 2001, no. 12, pp. 13–44 (in Russian).
10. Fateev S. A., Rynskov E. V., Yasyukovich D. O. *Istochniki toka dlya implantiruemykh meditsinskih priborov* [Power Sources for implantable medical devices]. *Vestnik RAEN [Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences]*, 2007, vol. 7, no. 3, pp. 33–36. (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Фатеев Сергей Анатольевич – доктор технических наук, академик РАЕН, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», Москва. Служебный телефон: (495) 362-75-19, e-mail: serfat@list.ru

Пуцылов Иван Александрович – кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», Москва. Служебный телефон: (495) 362-75-19, e-mail: putsylov@yandex.ru

Смирнов Сергей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», Москва. Служебный телефон: (495) 362-75-19, e-mail: smirnovsy@mail.ru

Фомин Денис Васильевич – ведущий инженер, АО Научно-исследовательский и проектно-технологический институт электроугольных изделий, Московская область, Электроугли. Служебный телефон: (499) 270-64-12, e-mail: niiei@DIO.ru