

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕАКТОРА ДЛЯ НАРАБОТКИ РЕАГЕНТА

А.В. Ельчанинов

79068496545@yandex.ru

SPIN-код: 8566-7470

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследована возможность применения реактора для наработки гидроксида железа, используемого для очистки вод. Рассмотрены затраты электроэнергии на проведение процесса электрокоагуляции и возможные пути их снижения. Показаны преимущества реактора для наработки гидроксида железа по сравнению с проточным электрокоагулятором. Собрана установка и проведены опыты по определению концентрации железа в зависимости от времени наработки реагента. Выполнено сравнение полученных результатов с теоретическими, полученными по закону Фарадея. Рассчитаны значения коэффициентов выхода по току для разных моментов времени, а также удельный расход электроэнергии на получение одного грамма железа.

Ключевые слова

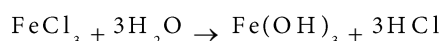
Очистка вод, электрокоагуляция, электропроводность, закон Фарадея, коэффициент выхода по току, энергоэффективность, коагуляция, гидроксиды железа

Поступила в редакцию 08.04.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. На большинстве станций очистки воды в том или ином виде применяется реагентная обработка. В качестве реагентов для изменения кислотности воды можно использовать кислоты либо щелочи, для дезинфекции воды — реагенты, содержащие хлор, но наиболее распространенными реагентами служат коагулянты. В основном коагулянты применяют для очистки воды от коллоидных загрязнений, однако в качестве коагулянтов также используют гидроксиды железа, которые являются сильными сорбентами. Благодаря высокой сорбционной силе помимо коллоидных загрязнений они способны удалять из воды нефтепродукты, красители, фосфор и другие загрязняющие вещества [1–3].

Гидроксиды железа, необходимые для очистки воды, можно получить двумя способами. Первый способ заключается в растворении хлорида железа в воде, в результате чего протекает реакция



Второй способ заключается в электролизе воды, в котором анодом служит стальной электрод. В результате окисления анода ионы железа переходят в раствор, в котором, взаимодействуя с водой, образуют гидроксиды железа.

Гидроксиды, полученные электрохимическим путем, зачастую показывают лучшую эффективность в процессах очистки воды [4], однако существенным

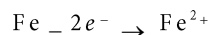
недостатком данного способа является высокое потребление электроэнергии, что значительно сказывается на экономических затратах.

На практике широкое применение нашли проточные электрокоагуляторы [5, 6], однако при работе электрокоагулятора в потоке сложно подобрать эффективный с точки зрения электросбережения режим работы.

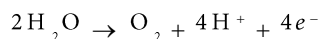
При использовании реактора для наработки гидроксида железа появляется возможность создать наиболее благоприятные условия для наработки реагента, при которых могут быть снижены удельные затраты электроэнергии на единицу массы реагента.

Процессы, протекающие в реакторе. Реактор представляет собой сосуд, наполненный водой, содержащей ионы хлорида натрия. В сосуд погружены два стальных электрода. При подаче напряжения на электроды начинается процесс электролиза, в результате чего на аноде протекают реакции окисления, а на катоде — восстановления.

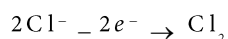
Если начать увеличивать разность потенциалов, то на аноде будут постепенно происходить различные реакции окисления. Реакцией окисления, имеющей минимальный электродный потенциал, является реакция окисления железа, протекающая по уравнению [7]



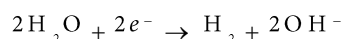
При достижении потенциалом анода значения электродного потенциала кислорода начинается окисление воды:



При дальнейшем снижении потенциала анода начинается реакция окисления хлора, имеющая наибольший электродный потенциал:



На катоде основной реакцией является реакция восстановления водорода из воды:



Для протекания данных электрохимических реакций требуется перемещение заряда, что эквивалентно совершению работы внешнего электрического поля. Поскольку реакции выделения хлора и кислорода являются побочными, оптимальный режим работы должен минимизировать скорость этих реакций.

Скорость протекания электрохимической реакции характеризуется массой прореагировавшего вещества в единицу времени. Масса прореагировавшего вещества связана с плотностью тока законом Фарадея:

$$m = A i S t,$$

где A — электрохимический эквивалент; i — плотность тока; S — площадь поверхности электрода; t — время процесса.

Количество затрачиваемой электрической энергии пропорционально плотности тока, поэтому наиболее эффективной является наработка гидроксида железа в условиях максимальной парциальной плотности тока реакции окисления железа.

С точки зрения количественной оценки энергоэффективности процесса электрокоагуляции имеет смысл ввести величину, которая показывает, сколько энергии требуется для получения единицы массы ионов железа:

$$c = \frac{W}{m}.$$

где W — количество энергии, затраченной на получение m граммов ионов железа.

Подставив значение массы из закона Фарадея с учетом того, что количество затраченной энергии равно работе по перемещению заряда, получим:

$$c = \frac{IU t}{\eta^A I t} = \frac{U}{\eta^A},$$

где I — сила тока; U — разность потенциалов электродов; η — коэффициент выхода по току.

Коэффициент выхода по току показывает отношение практически измеренной массы вещества к ее теоретическому значению, рассчитанному по закону Фарадея:

$$\eta = \frac{m_{\text{практ}}}{m_{\text{теор}}}.$$

Вводя величину электропроводности, можно перейти к следующей записи:

$$c = \frac{Il}{\eta^A \chi^S} = \frac{il}{\eta^A \chi},$$

где l — расстояние между электродами; χ — электропроводность.

Величина электропроводности характеризуется наличием переносчиков заряда — ионов. С увеличением концентрации ионов электропроводность возрастает. Также электропроводность линейно увеличивается с ростом температуры [8]:

$$\chi_t = \chi_{25} [1 + \alpha (t - 25)],$$

где χ_t — электропроводность воды при температуре t , °C; χ_{25} — электропроводность при температуре 25 °C; α — коэффициент, зависящий от вида электролита.

В процессе электролиза растворение железа происходит по двум механизмам. Первый механизм — электрохимический, второй — химический [9]. Элек-

трохимический основан на переносе источников заряда под действием электрического поля, химический механизм — на химическом взаимодействии железа с водой и содержащимися в ней ионами.

Если бы происходило только электрохимическое растворение железа, значение коэффициента выхода по току ограничивалось бы единицей, а в большинстве опытов было бы меньше единицы. Протекание химического растворения может обеспечить значение коэффициента выхода по току больше единицы.

Таким образом, для снижения расхода электроэнергии на получение гидроксида железа необходимо увеличивать электропроводность воды, уменьшать расстояние между электродами и минимизировать плотность тока. Также следует подбирать режимы работы реактора таким образом, чтобы коэффициент выхода по току принимал максимальное значение. При создании реактора для наработки реагента в отличие от проточных реакторов появляется возможность контролировать температуру рабочей смеси, ее электропроводность и время электрокоагуляции, что позволяет подобрать наиболее энергоэффективный режим работы.

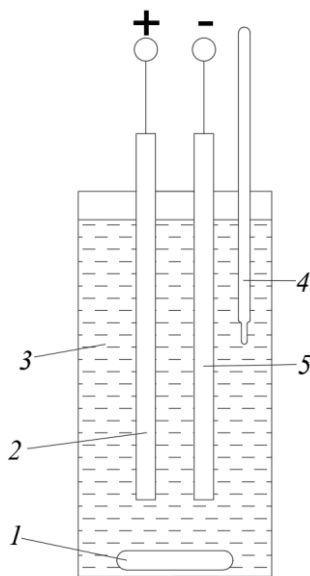


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — магнитная мешалка; 2 — анод;
3 — вода; 4 — термометр; 5 — катод

анализа. Отобранные пробы рабочей жидкости фильтруют через бумажный фильтр, который затем высушивают до постоянной массы при 105 °С.

Проведение эксперимента. В качестве реактора используют химический стакан, в который заливают 1 л дистиллированной воды, а затем добавляют и размешивают с помощью магнитной мешалки 5 г хлорида натрия. В качестве

Экспериментальная установка. Реактор для наработки коагулянта представляет собой цилиндрический сосуд, в который помещены два электрода из стали марки Ст3. Расстояние между электродами постоянно и равно 5 мм.

На дне сосуда расположена магнитная мешалка, а сам реактор заполняется водой (рис. 1). Мешалка необходима для поддержания однородности среды в реакторе, что обеспечит отсутствие концентрационной поляризации вблизи поверхности электродов.

Также в реакторе расположен термометр, позволяющий непрерывно измерять температуру воды. Для создания разности потенциалов между электродами используется источник постоянного тока Mastech NY1503D.

Концентрацию железа в воде определяют с помощью гравиметрического

электродов выбирают листы из стали марки Ст3 с зафиксированным расстоянием 5 мм между электродами. Рабочая площадь поверхности в процессе эксперимента составляет $18,5 \text{ см}^2$, а плотность тока $0,1 \text{ А/см}^2$. Таким образом, в течение эксперимента поддерживалась сила тока $1,85 \text{ А}$.

Опыт проводили в течение одного часа. Показания температуры и напряжения снимали каждые 10 мин эксперимента. Пробы на определение концентрации железа отбирали каждые 20 мин. После отбора пробы ее фильтровали через бумажный фильтр, который предварительно высушили и взвесили. Фильтр, содержащий отфильтрованное железо, помещали в печь. Температура в печи составляла $105 \text{ }^\circ\text{C}$, фильтр сушили до постоянной массы.

Фильтр после сушки показан на рис. 2. По этому изображению можно сделать вывод, что железо на фильтре представлено в виде трехвалентного оксида.

Градусник и электроды крепили на штатив; поскольку после отбора проб уровень жидкости в реакторе уменьшался, после каждого отбора проб электроды опускали на высоту уменьшения уровня жидкости.

Результаты эксперимента и обсуждение. Поскольку сила тока в эксперименте составляла лишь $1,85 \text{ А}$, а объем рабочей жидкости был равен 1 л , то сильного изменения температуры, а вместе с ней и напряжения не наблюдалось (рис. 3). На рис. 3 видно, что температура и напряжение обратно пропорциональны, что показано в формулах выше.

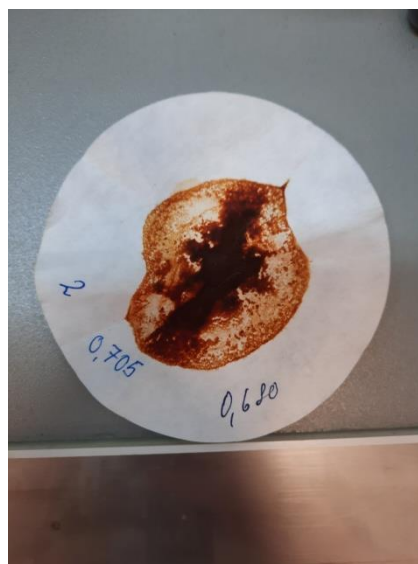


Рис. 2. Высушенный фильтр

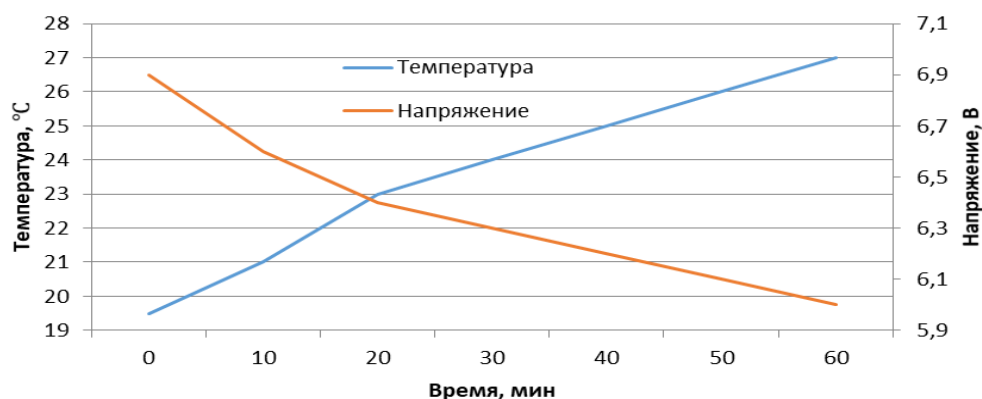


Рис. 3. Изменение температуры и напряжения в зависимости от времени

Измеренная масса оксида железа в пробах была пересчитана на весь объем реактора с учетом содержания железа в оксиде железа. На рис. 4 представлены результаты измеренной массы, массы, рассчитанной по закону Фарадея, а также их отношение, представляющее собой коэффициент выхода по току.

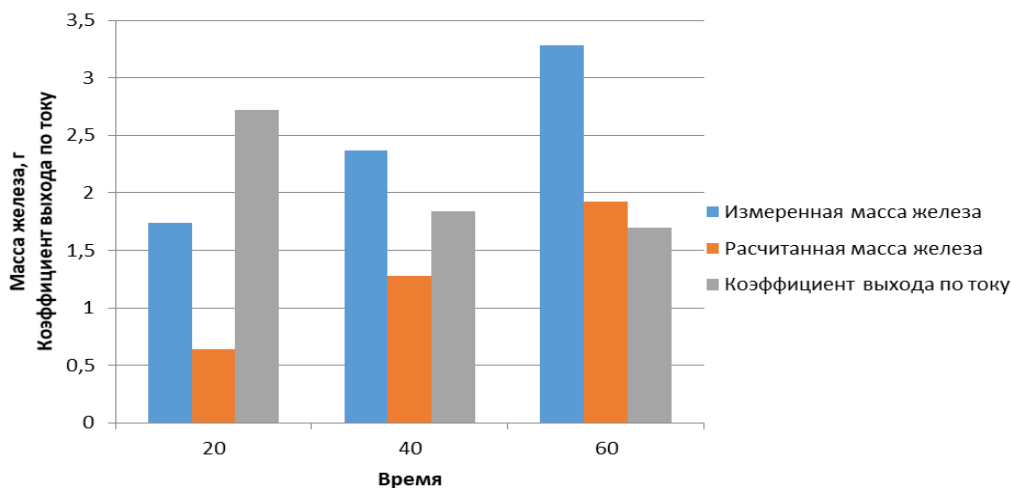


Рис. 4. Измеренная и рассчитанная масса железа

На рис. 4 видно, что масса железа увеличивается с течением времени, однако скорость образования железа различна. В начале эксперимента скорость образования железа имеет максимальное значение, что характеризуется максимальным выходом по току. Затем скорость растворения железа значительно снижается, вместе с этим снижается и коэффициент выхода по току.

В [10] авторы получают похожие коэффициенты выхода по току при периодической электрокоагуляции с применением алюминиевых электродов.

Данное явление объясняется тем, что при наличии в рабочей жидкости ионов железа, в соответствии с уравнением Нернста, потенциал анода будет смещаться в сторону положительных значений. Это повлечет за собой смещение поляризационной кривой растворения железа, из-за чего произойдет снижение парциальной плотности тока окисления железа.

С увеличением концентрации ионов железа в растворе возможно протекание процесса восстановления железа на катоде, в результате чего меньше железа перейдет в форму нерастворимых гидроксидов.

На рис. 5 изображена зависимость удельного энергопотребления реактора от времени электролиза. В силу небольшого изменения температуры изменение электропроводности невелико, поэтому можно считать, что энергопотребление обратно пропорционально коэффициенту выхода по току.

Выводы. Таким образом, используя реактор для выработки реагента, можно обеспечить снижение затрат электроэнергии на получение гидроксида железа. Благодаря добавлению хлорида натрия в воду процесс анодного растворения значительно интенсифицируется, чего нельзя было бы добиться в проточном

электрокоагуляторе. Превышение коэффициента выхода по току значения единицы свидетельствует об интенсивном протекании процесса химического растворения железа.

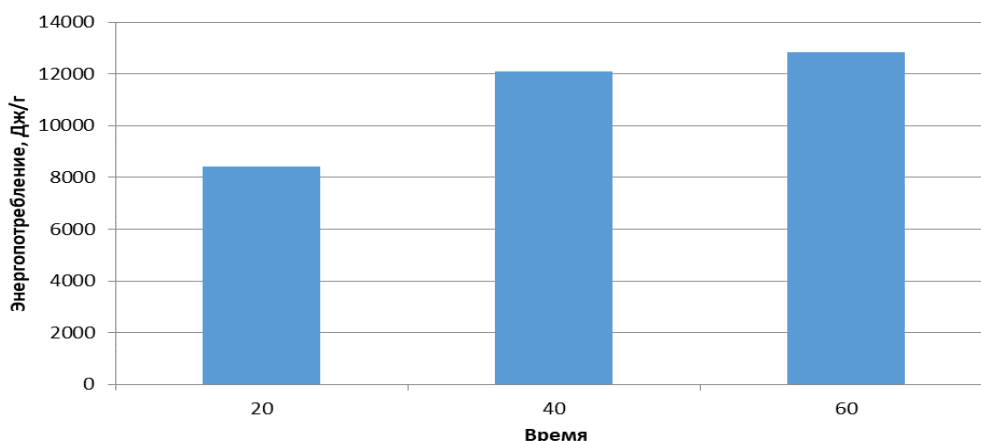


Рис. 5. Зависимость удельного энергопотребления реактора от времени электролиза

Поскольку первые 20 мин работы реактора являются наиболее энергоэффективными, можно рассмотреть ситуацию, при которой по истечении 20 мин работы реактор останавливается, происходит отделение гидроксидов железа из рабочей жидкости путем отстаивания, а затем в реактор добавляется необходимое количество воды и процесс наработки повторяется. Это позволит получать более концентрированный коагулянт с меньшими затратами электроэнергии.

Литература

- [1] Максимович В.Г., Попова Г.Г., Сахаров Д.И. и др. Электрокоагуляционная очистка образцов сточных вод ЗПВ «Бугундырь». *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*, 2012, № 10, с. 18–20.
- [2] Şengil I.A., Özacar M. The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes *J. Hazard. Mater.*, 2009, vol. 161, no. 2–3, pp. 1369–1376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.100>
- [3] Grøterud O., Smoczyński P. Phosphorus removal from water by means of electrolysis. *Water Res.*, 1986, vol. 20, no. 5, pp. 667–669. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(86\)90032-1](https://doi.org/10.1016/0043-1354(86)90032-1)
- [4] Cañizares P., Jiménez C., Martínez F., et al. The pH as a key parameter in the choice between coagulation and electrocoagulation for the treatment of wastewaters *J. Hazard. Mater.*, 2009, vol. 163, no. 1, pp. 158–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.073>
- [5] Мосин О.В. Технологический расчет установок электрофлотации воды. *С.О.К.*, 2014, № 1, с. 28–35.
- [6] Кульский Л.А., Строкач П.П. Технология очистки природных вод. К., Вища школа, 1986.
- [7] Гуров А.А., Бадаев Ф.З., Овчаренко Л.П. и др. Химия. М., Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2004.

- [8] Сваровская Н.А., Колесников И.М., Винокуров В.А. Электрохимия растворов электролитов. Ч. 1. Электропроводность. М., РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2017.
- [9] Дрожич Д.М., Попич И.П. О химическом растворении железа в водных растворах. *Электрохимия*, 2000, т. 36, № 10, с. 1182–1190.
- [10] Vepsäläinen M., Ghiasvand M., Selin J., et al. Investigations of the effects of temperature and initial sample pH on natural organic matter (NOM) removal with electrocoagulation using response surface method (RSM). *Separ. Purif. Technol.*, 2009, vol. 69, no. 3, pp. 255–261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.08.001>

Ельчанинов Алексей Владимирович — студент кафедры «Экология и промышленная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Ксенофонтов Борис Семенович, доктор технических наук, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ельчанинов А.В. О возможности применения реактора для наработки реагента. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 04(57). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-04-692>

ON THE POSSIBILITY OF USING THE REACTOR FOR THE REAGENT PRODUCTION

A.V. Elchaninov

79068496545@yandex.ru

SPIN-code: 8566-7470

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The possibility has been investigated of using a reactor for the production of iron hydroxide used for water purification. The costs of electricity for the electrocoagulation process and possible ways to reduce them are considered. The advantages of a reactor for the production of iron hydroxide in comparison with a flow-through electrocoagulator are shown. The installation was assembled and experiments were carried out to determine the iron concentration depending on the time of the reagent production. The results obtained are compared with theoretical ones obtained according to Faraday's law. The values of the current efficiency coefficients for different points in time, as well as the specific power consumption for the production of one gram of iron, have been calculated.

Keywords

Water treatment, electrocoagulation, electrical conductivity, Faraday's law, current efficiency, energy efficiency, coagulation, iron hydroxides

Received 08.04.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Maksimovich V.G., Popova G.G., Sakharov D.I., et al. Electrocoagulation treatment of sewage formation waters samples of NTA "Bugundyr". *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental Protection in Oil and Gas Complex], 2012, no. 10, pp. 18–20 (in Russ.).
- [2] Şengil I.A., Özacar M. The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes *J. Hazard. Mater.*, 2009, vol. 161, no. 2–3, pp. 1369–1376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.100>
- [3] Grøterud O., Smoczyński P. Phosphorus removal from water by means of electrolysis. *Water Res.*, 1986, vol. 20, no. 5, pp. 667–669. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(86\)90032-1](https://doi.org/10.1016/0043-1354(86)90032-1)
- [4] Cañizares P., Jiménez C., Martínez F., et al. The pH as a key parameter in the choice between coagulation and electrocoagulation for the treatment of wastewaters *J. Hazard. Mater.*, 2009, vol. 163, no. 1, pp. 158–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.073>
- [5] Mosin O.V. Engineering simulation of electroflotation plants. *S.O.K.*, 2014, no. 1, pp. 28–35 (in Russ.).
- [6] Kul'skiy L.A., Strokach P.P. *Tekhnologiya ochistki prirodnykh vod* [Purification technology for natural waters]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1986 (in Russ.).
- [7] Gurov A.A., Badaev F.Z., Ovcharenko L.P., et al. *Khimiya* [Chemistry]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004 (in Russ.).
- [8] Svarovskaya N.A., Kolesnikov I.M., Vinokurov V.A. *Elektrokhimiya rastvorov elektrolitov. Ch. 1. Elektroprovodnost'* [Solution electrochemistry. P. 1. Conductivity]. Moscow, RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina Publ., 2017 (in Russ.).

- [9] Drazhich D.M., Popich I.P. Chemical dissolution of iron in aqueous solutions. *Elektrokhimiya*, 2000, vol. 36, no. 10, pp. 1182–1190 (in Russ.).
- [10] Vepsäläinen M., Ghiasvand M., Selin J., et al. Investigations of the effects of temperature and initial sample pH on natural organic matter (NOM) removal with electrocoagulation using response surface method (RSM). *Separ. Purif. Technol.*, 2009, vol. 69, no. 3, pp. 255–261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.08.001>

Elchaninov A.V. — Student, Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Ksenofontov B.S., Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Elchaninov A.V. On the possibility of using the reactor for the reagent production. *Politekhničeskij molodezhnyj zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 04(57). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-04-692.html> (in Russ.).