

УДК 546.265.4

DOI: 10.15593/2224-9982/2022.71.19

**М.Д. Терещенко, М.И. Ябуров, В.Ю. Лукоянов,
Л.Л. Хименко**

Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Россия

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ИНТЕРКАЛИРОВАННОГО ГРАФИТА

Целью статьи является анализ способов и методов интеркалирования графитовых структур. Освещено интеркалирование графита в двойных и тройных системах. Систематизируется и обобщается материал, представленный в открытой литературе. Интеркалированный графит используют для получения терморасширенного графита, который применяется во многих областях производства. Данная статья может быть интересна предприятиям, занимающимся получением графитовой фольги и уплотнительных изделий на её основе, теплоизоляционных материалов, фильтров, композитов с низким электросопротивлением, сорбентов для сбора минеральных масел и нефти.

Ключевые слова: интеркалированный графит, интеркалированные соединения графита, тройные соединения внедрения в графит, тройные интеркалированные соединения графита, способность интеркалирования, модифицированный, бисульфат графита, нитрат графита, интеркалат, интеркалят, насыпная плотность.

**M.D. Tereshchenko, M.I. Yaburov, V.Yu. Lukoyanov,
L.L. Himenko**

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

REVIEW OF THE EXISTING METHODS FOR INTERCALING GRAPHITE

The aim of the article is to analyze the ways and methods of intercalation of graphite structures. The article highlights the intercalation of graphite in binary and ternary systems. The article systematizes and summarizes the material presented in the open literature. Intercalated graphite is used to obtain thermally expanded graphite, which is used in many areas of production. This article may be of interest to enterprises involved in the production of graphite foil and sealing products based on it, heat-insulating materials, filters, composites with low electrical resistance, sorbents for collecting mineral oils and oil.

Keywords: intercalated graphite, ICG, TICG, intercalation ability, modified intercalated graphite, graphite bisulfate, GB, graphite nitrate, GN, bulk density.

Терморасширенный графит (ТРГ) применяется в качестве сырья для создания уплотнительных материалов на его основе и регламентируется ГОСТ 34708-2021. Также ТРГ применяется в качестве сорбента и нормируется по ОСТ-153-39.0-026-2002. По данным документам качество ТРГ регламентируется следующими параметрами: массовыми долями (углерода, золы, серы, хлорид-ионов и фторид-ионов в водной вытяжке). Одной из главных характеристик ТРГ является насыпная плотность. Параметры изделия, созданного из ТРГ, напрямую зависят от свойств его предшественника – интеркалированного графита (ИГ). Изменяя способ получения ИГ и глубину протекания процесса – номера ступени, возможно получить материал с заданными физико-химическими свойствами, т.е. управлять процессом интеркалирования. Различают два основных способа интеркалирования графита – химический и электрохимический.

Химический способ основан на прямой реакции твердых графитовых материалов с интеркаляционными соединениями (обычно в жидкой или паровой фазе). Химическая модель образования ИГ предполагает осуществление сопряженных реакций окисления и внедрения.

Электрохимический способ основан на использовании гальванической ванны, где в качестве анода выступает графитовый электрод. Электролит, в свою очередь, представляет собой раствор интеркалата. Катодом служит электрод из инертного металла.

На сегодняшний день известно об использовании в промышленности как наиболее изученных двух технологий интеркалирования графита, с некоторыми их изменениями, серной и азотной кислотами.

Были исследованы и проанализированы двойные системы, состоящие из графита, серной или азотной кислот, и тройные системы, состоящие из графита, серной или азотной кислот, вместе с добавкой в виде фосфорной, уксусной, пропионовой, борной кислот. Также проводили интеркалирование графита с помощью хлоридов металлов градиентным жидкофазным методом, а также с помощью анодного окисления [2, 3].

Химические способы

Система «H₂SO₄ – добавка»

Был проведен классический синтез бисульфата графита (БГ). Он был основан на взаимодействии графита с концентрированной 94 масс. %-ной серной кислотой в присутствии химических окислителей или анодном окислении.

Были установлены значения редокс-потенциалов, получения определенной степени интеркалированных соединений графита (ИСГ). На основании использования стандартной шкалы редокс-потенциалов были приведены термодинамические условия образования определенной степени ИСГ [1], что упростило оценку возможности самопроизвольного протекания химической реакции для замкнутых систем, вычисляя свободную энергию Гиббса.

Был исследован способ получения БГ путём насыщения пульпы графита, находящейся в концентрированной серной кислоте, газами-окислителями, которые доставляются в пульпу при помощи газа-носителя. В качестве газов-окислителей предложено использовать озон, хлор или их смесь. Газ-носитель представляет собой простой воздух [4].

Существуют модификации данного классического способа получения БГ. В патенте [5] предлагается использовать борную кислоту. Полученный таким образом интеркалированный графит содержит частицы графита, поверхность которых равномерно покрыта кристаллами борной кислоты, которая улучшает антиокислительные свойства полученной графитовой фольги.

В патенте [6] обрабатывали порошкообразный графит раствором кобальта в концентрированной серной кислоте. Оксид кобальта (CO₃O₄) выступал одновременно в качестве окислителя и модифицирующей добавки.

Самопроизвольное внедрение HNO₃ в графит

Была установлена зависимость роста потенциала азотной кислоты от ее концентрации, окислительная способность и условия ее самовнедрения в графитовую матрицу. Определено влияние дополнительного окислителя и пороговой концентрации кислоты на степень внедрения и способность к интеркалированию. Впервые показана зависимость окислительной способности от добавления дополнительного окислителя. Добавление KMnO₄ приводит к снижению пороговой концентрации HNO₃ до 40 масс. % при сохранении окислительной способности раствора, достаточной для образования низших ступеней нитрата графита (НГ) [1].

Также существует модификация данного классического способа получения НГ. На первом этапе получают НГ II – III степени внедрением концентрированной азотной кислоты в природный графит. Отмечается, что HNO₃ может быть разбавлена. На втором этапе НГ II – III степени обрабатывается раствором аммиака. В результате получают тройные интеркалированные соединения графита (ТИСГ), в межкристаллитных областях которого формируется нитрат аммония [7].

Система «графит – HNO₃ – H₂SO₄»

Было описано образование коинтеркалированного ИСГ I ступени, содержащего в одном слое два интеркалата, HNO₃- и H₂SO₄, из-за их одновременного внедрения. Динамика процесса зависит от состава окислительной смеси. Предполагается, что состав коинтеркалированных ИСГ является переменным и зависит от соотношения кислот в растворе [1].

Также проводили исследования внедрения 98 масс. %-ной HNO₃ и 96 масс. %-ной H₂SO₄ при варьировании объемных соотношений. Выявлено, что в зависимости от состава окислительного раствора возможен синтез бинарных соединений внедрения в графит (СВГ) либо тройных соединений внедрения в графит (ТСВГ). Данные химического анализа показали в ТСВГ присутствие обеих кислот. Впервые было показано, что ТСВГ имеют переменный состав, а количество азотной и серной кислот в интеркалированном слое зависит от содержания HNO₃ – H₂SO₄ в растворе [8].

Анализ литературы показал, что для промышленного получения бисульфата графита широко применяется синтез этого соединения в тройной системе «графит – HNO₃ – H₂SO₄», где азотная кислота является окислителем. Концентрация используемой азотной кислоты, как правило, составляет 60–65 масс. % при оптимальном массовом соотношении HNO₃ : H₂SO₄ = 1 : 9 [15, 16].

Система «графит – HNO₃ – H₃PO₄»

Определена концентрационная область границы внедрения. Впервые были синтезированы ИСГ II ступени в растворах с 28–44 масс. % HNO₃. Установлено, что процесс интеркалирования идет в два этапа взаимодействия. Во время первого этапа фосфорная кислота не участвует в процессе интеркалирования, образуется нитрат графита. На втором этапе происходит обменная реакция между интеркалированной азотной и находящейся в растворе фосфорной кислотами с образованием новой фазы. Толщина новой фазы увеличена в сравнении с НГ, так как эффективный диаметр HNO₃ меньше, чем у H₃PO₄ [1, 8]. При анодном окислении графита второй этап – это совнедрение HNO₃ и H₃PO₄ в графитовую матрицу [8].

Был исследован способ спонтанного внедрения в системе «графит – 85 масс. % HNO₃ – H₃PO₄». При спонтанном внедрении в результате образовался нитрат графита. Пороговая граница внедрения находится в области 23 масс. %-ной HNO₃. Химический анализ ИСГ показал наличие в образцах только азотной кислоты. Данную систему возможно применять только с целью снижения концентрации азотной кислоты.

Система «графит – HNO₃ (H₂SO₄) – RCOOH»

В работе [1] приведены данные об отсутствии уксусной кислоты в ИСГ. Слабая CH₃COOH не способствует образованию тройных ИСГ. Проведенные исследования показывают, что совнедрение кислоты в графитовую матрицу зависит от ее способности интеркалирования, а номер ступени – от редокс-потенциала.

Были проведены исследования произвольного интеркалирования в системе «графит – HNO₃ – CH₃COOH» при разных объемных соотношениях кислот. При содержании HNO₃ более 73 масс. % образуются СВГ III ступени. С уменьшением содержания HNO₃ номер ступени СВГ повышается, а также увеличивается время синтеза. Физико-химический анализ полученных соединений показал присутствие в графитовой матрице только азотной кислоты [8]. Следовательно, спонтанное интеркалирование графита в растворах HNO₃ – CH₃COOH приводит к получению только НГ.

Но существуют и обратные данные. В работе [9] ИСГ синтезировали методом последовательной обработки графита, сначала HNO₃ (H₂SO₄) и затем HCOOH (CH₃COOH, C₂H₅COOH). На втором этапе был получен ТИСГ внедрением HCOOH (CH₃COOH, C₂H₅COOH) в матрицу НГ (БГ). Результаты исследований показали, что при синтезе ТИСГ имеет место частичное

деинтеркалирование HNO_3 (H_2SO_4), при котором повышается ступень ТИСГ и замещаются молекулы HNO_3 (H_2SO_4) на молекулы RCOOH в интеркалированном слое.

Установлено, что механизм интеркалирования графита в данной системе определяется длиной карбоновой цепи для $R = \text{H}$, CH_3 сначала синтезируется БГ (НГ) и затем внедряется смесь кислот с образованием ТИСГ, которое с течением времени разлагается до БГ (НГ) [9]. Поэтому в работах [1, 8] не были получены ТИСГ для данных систем.

Жидкофазный метод

Также хлор может выступать не только в качестве окислителя, но и интеркалирующего агента, например в жидкофазном методе. Он является одним из наиболее легких. Интеркалирование природного графита происходит из раствора хлорида металла в тетрахлорметане, находящемся в токе хлора. Ограничением данного метода является растворимость хлоридов металлов в данной системе CCl_4 ($S \geq 4$ ммоль/л) при условии, что газообразный хлор необходимо пропускать через реакционную смесь (≈ 5 мл / мин). Данный метод пригоден только для получения ИСГ с помощью FeCl_3 или другими легко внедряющимися хлоридами. Данный метод был рассмотрен в статье [11]. А по данному методу получен патент [12].

Градиентный метод

Синтез ИСГ проходит в двухсекционной ампуле, одна часть которой содержит графит, а другая интеркалат. Графит нагревают на $30\text{--}50$ °С выше температуры хлорида металла для образования насыщенных паров. Варьируя градиент температуры, получают ИСГ разных ступеней.

Ограничения данного метода: требуются хлориды металлов высокой летучести, присутствие хлора, высокие температуры, продолжительный синтез, сложное приборное оформление. Недостатком метода является наличие примеси переносчика в конечном продукте [2, 3, 10].

Заключение по химическим методам интеркалирования графита

Одним из главных достоинств химических методов является простота управления процессом интеркалирования. Изменяя только концентрации реагентов, возможно получать ИСГ заданное соединение внедрения, так как получены системы переменного состава, который зависит от содержания в растворе интеркалирующих кислот.

Недостатком данных методов является очень низкая скорость реакции, поэтому для ускорения процесса интеркалирования используют: нагревание, ультразвук и высокие концентрации интеркалирующего агента. В сравнении с электрохимическими методами получения ИСГ использование таких методов имеет относительно низкую себестоимость.

Электрохимические способы

Анодное окисление графита в растворах HNO_3

Был исследован процесс электрохимического внедрения HNO_3 в высокоупорядоченный пиролитический графит и установлено, что электрохимическая обработка увеличивает область концентраций внедрения HNO_3 . Далее были выявлены три интервала с разными механизмами внедрения. Результаты экспериментов показали, что, изменяя концентрацию кислоты, силу тока и продолжительность воздействия тока, можно влиять на динамику процесса и изменять его механизм. Это позволяет синтезировать соединения с определёнными физико-химическими свойствами. Выявлено, что электрохимическое окисление тормозит реакцию интеркалирования [1]. Поэтому для получения простого НГ данный способ нерационален.

Система «графит – HNO_3 – RCOOH »

В комплексном электролите HNO_3 – CH_3COOH в зависимости от содержания HNO_3 возможен синтез I или II ступени бинарного ИСГ нитрата графита. Изменение характера интеркалирования по сравнению с химическим внедрением не наблюдается [1].

В сравнении со спонтанным интеркалированием графита в данной системе электрохимическое окисление графита в смешанном электролите HNO_3 – CH_3COOH приводит к расширению концентрационного диапазона HNO_3 . Однако, как и в случае со спонтанным внедрением, электрохимический синтез приводит к получению НГ [8]. Данный способ также не несет никакой практической пользы.

Система «графит – H_2SO_4 – H_3PO_4 »

Известно, что синтез двойных интеркалированных соединений, содержащих более одного интеркалата, открывает возможность неограниченного варьирования свойств и структуры ИСГ. Электрохимическое коинтеркалирование графита наблюдается во всей области соотношений кислот и протекает при 80 °С. Внедрение фосфорной кислоты происходит одновременно с серной кислотой в виде части сольватных молекул бисульфат-иона во всем концентрационном диапазоне образования интеркалированных соединений, содержание H_2SO_4 варьируется от 2 до 96 масс. %, что определяется сходством свойств и тетраэдрической симметрии и размера молекул H_2SO_4 и H_3PO_4 . Состав внедренного слоя тройного ИСГ коррелирует с составом электролита. Кривые заряжения в комплексном электролите H_2SO_4 – H_3PO_4 носят типичный ступенчатый характер. Установлено, что при повышении содержания H_3PO_4 толщина интеркалированного слоя увеличивается и наблюдается повышение номера ступени ИСГ [1].

Система «графит – HNO_3 – H_3PO_4 »

При изучении интеркалирования графита в системе азотной и фосфорной кислот было установлено, что образование ТИСГ происходит в два этапа. Сначала синтез бинарного ИСГ, а затем одновременное внедрение двух интеркалатов на стадии переокисления нитрата графита. В итоге образуется ТИСГ переменного состава I ступени [1].

Был исследован способ электрохимического внедрения при помощи которого получили весь спектр ступеней НГ. Пороговая граница внедрения находится в области ~10 масс. % HNO_3 . Таким образом, в системе «С – 85 масс % HNO_3 – H_3PO_4 возможно получение только НГ, независимо от способа синтеза. Однако разбавление азотной кислоты фосфорной приводит к расширению концентрационных границ образования нитрата графита [8].

Процесс электрохимического ко-интеркалирования графита протекает во всём диапазоне образования интеркалированных соединений при совнедрении серной и фосфорной кислот. Состав внедренного слоя ТИСГ зависит от электролита. Повышение содержания H_3PO_4 влечёт увеличение толщины интеркалированного слоя. При увеличении содержания серной кислоты номер ступени ТИСГ понижается [9].

Система «графит – HNO_3 (H_2SO_4) – H_2O ($\text{C}_3\text{H}_5\text{OH}$)»

Синтез ИСГ осуществляется анодным окислением графита в смешанных электролитах в широком диапазоне концентраций H_2SO_4 . Амфитропные растворители (H_2O , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) не совнедряются в графитовую матрицу, и конечным продуктом является БГ. При замене воды на $\text{C}_3\text{H}_5\text{OH}$ повышается порог внедрения H_2SO_4 с 30 до 70 масс. %.

Синтезировали ИСГ методом последовательной обработки графита сначала HNO_3 и затем H_2O ($\text{C}_3\text{H}_5\text{OH}$). По данному методу на первом этапе были синтезированы НГ I–V ступеней. На втором этапе обработка НГ амфитропными растворителями. В результате химического анализа установлено, что амфитропные растворители не совнедряются в матрицу [9].

Анодное окисление

Синтез ИСГ с хлоридами металлов возможен при анодном окислении. Графитовый анод находится в расплаве хлорида внедряемого металла, к которому добавили хлорид калия для увеличения электропроводности. Хлор способствует образованию заряженного слоя интеркалата. Метод пригоден для синтеза ИСГ с любым хлоридом металла.

Недостатки: сложность приборного оформления, высокие температуры, загрязнение синтезируемого соединения расплавом электролита. Такой метод был рассмотрен в статьях [13, 14]. По данному методу получен патент [12].

Заключение по электрохимическим методам интеркалирования графита

Электрохимические способы интеркалирования для системы «графит – кислота» не требуют внедрения дополнительного окислителя, что благоприятно сказывается на химической чистоте конечного продукта. Электрический ток позволяет осуществлять контролируемый процесс интеркалирования, возможно задавая значения силы тока, и получать интеркалированные системы с определенной степенью внедрения. В тройных системах с участием HNO_3 (H_2SO_4) электрический ток способствует расширению концентрационных областей внедрения интеркалирующего агента.

Главным недостатком данных методов является высокая стоимость электроэнергии, поэтому возникают большие сложности в их масштабировании.

Выводы

Установлены составы бинарных и коинтеркалированных соединений, которые являются соединениями с широкой областью гомогенности. Определен ряд важных электрофизических характеристик бинарных ИСГ с серной и азотной кислотами. Установлена доминирующая роль номера ступени на физико-химические свойства ИСГ и новых углеродных материалов на их основе-окисленного графита и пенографита.

На основании представленных данных возможно сделать выводы о том, что, несмотря на обилие способов получения ИСГ, актуальными остаются классические методы интеркалирования – серной и азотной кислотами. Это связано с обилием представленной информации, устойчивостью, безопасностью полученных соединений, а также с экономической составляющей.

Однако тройные системы показывают, что благодаря наличию второго интеркалата, появляется возможность снизить концентрационный порог внедрения. Кроме того, это позволяет уменьшить количество серной или азотной кислот в интеркалированном слое, тем самым снижая количество выделяемых вредных веществ при терморасширении, а также обеспечивает снижение себестоимости получения ИГ. Однако такие соединения получаются недостаточно устойчивыми, поэтому одним из перспективных направлений является повышение устойчивости ТИСГ.

Библиографический список

1. Сорокина Н. Е. Интеркалированные соединения графита с кислотами, синтез, свойства, применение: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. – М., 2007. – 47 с.
2. Erre R., Messaoudi A., Beguin F. Fine supported Ni, Co and Fe metals produced by graphite intercalation compounds: an XPS study // *Synthesis We met.* – 1988. – Vol.23. – P.493–501/
3. Intercalation compounds of graphite with nickel chloride: synthesis structure and intercalation mechanism / S. Flandrois, J.-M. Masson, J.-C Rouillon, J. Gaultier, C. Hauw. // *Synthesis. We met.* – 1981. – Vol. 3. – P. 1–13.
4. Способ получения интеркалированного графита: пат. 2 443 625 Рос. Федерация / Сорокина Н.Е., Годунов И.А., Свиридов А.А., Авдеев В.В. – № 2010134519/05; заявл. 19.08.2010; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 6. – 8 с.

5. Способ получения интеркалированного графита, интеркалированный графит и гибкий графитовый лист: пат. 2 422 406 Рос. Федерация / Максимова Н.В., Саидаминов М.И., Шорникова О.Н., Сорокина Н.Е., Авдеев В.В. – № 2010104530/03; заявл. 10.02.2010; опубл. 27.06.2011, Бюл. № 18. – 8 с.
6. Способ получения интеркалированного графита: пат. 2 427 532 Рос. Федерация / Сорокина Н.Е., Авдеев В.В. – № 2010104533/05; заявл. 10.02.2010; опубл. 27.08.2011, Бюл. № 24. – 5 с.
7. Способ получения интеркалированного графита: пат 2 415 078 Рос. Федерация / Шорникова О.Н., Сорокина Н.Е., Петров Д.В., Максимова Н.В., Свиридов А.А., Годунов И.А., Селезнев А.Н., Авдеев В.В. – № 2009136509/05; заявл. 05.10.2009; опубл. 27.03.2009, Бюл. № 9. – 7 с.
8. Максимова Н. В. Интеркалирование графита в системах $C - HNO_3 - R$, где $R = CH_3COOH, H_3PO_4, H_2SO_4$: дис ... канд. хим. наук. – М., 2002. – 168 с.
9. Шорникова О. Н. Модифицированный интеркалированный графит и пенографит на его основе: получение и свойства: автореф. дис ... канд. хим. наук. – М., 2008. – 24 с.
10. Metz V., Zimsgluss L. Studies of the kinetics of graphite intercalation with $FeCl_3$ vapors // *Matem. scientific and English*. – 1977. – Vol. 31. – P. 119–121
11. Lalancette J.M., Roy L., Lafontaine J. Metals intercalated into graphite. IV. Intercalation from CCl_4 solution and extraction of intercalated particles // *Can. J. Him.* – 1976. – Vol. 54. – P. 2505–2508.
12. Способ получения пенографита, модифицированного оксидами металлов триады железа, и пенографит: пат. 2 390 512 Рос. Федерация / Шорникова О.Н., Сорокина Н.Е., Авдеев В.В., Никольская И.И. – № 2008132984/03; заявл. 13.08.2008; опубл. 27.05.2010; Бюл. № 15. – 8 с.
13. Electrochemical intercalation of aluminum chloride into graphite in molten sodium chloraluminat. / K.S. Mohandas, N. Sanil, M. Noel, P. Rodriguez // *Carbon*. – 2002. – Vol. 41, No. 5. – P. 927–932.
14. Inagaki M., Wang Z.D., Sakakibara J. Differential thermal analysis of intercalation reactions in molten salts // *Synthesis. We met.* – 1989. – Vol. 31. – P. 319–326.
15. Scharff P. Upon the formation on the bi-intercalation compound with nitric and sulfiiric acid // *Materials Science Forum*. – 1992. – Vol. 91–93. – P. 23–28.
16. Пресс М.Д., Савостьянова Н.А., Юрковский И.М. Взаимодействие кристаллического графита со смесью концентрированных серной и азотной кислот // *Химия твердого топлива*. – 1989. – Т. 1.

References

1. Sorokina N. E. Interkalirovannye soedineniya grafita s kislotami, sintez, svoystva, primeneniye [Intercalated compounds of graphite with acids, synthesis, properties, application]: Ph. D. thesis Moscow, 2007, 47 p.
2. Erre R., Messaoudi A., Beguin F. Fine supported Ni, Co and Fe metals produced by graphite intercalation compounds: an XPS study: *Synth. We met.* – 1988. – T.23. – P.493-501;
3. Flandrois S., Masson J.-M., Rouillon J.-C, Gaultier J., Hauw C. Intercalation compounds of graphite with nickel chloride: synthesis structure and intercalation mechanism. *Synthesis. We met.* – 1981. – V.3. – S.1-13
4. Sorokina N.E., Godunov I.A., Sviridov A.A., Avdeev V.V. Sposob polichenya intercalirovannogo grafita [Method for obtaining intercalated graphite]: Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2010134519/05 (2010)
5. Maksimova N.V., Saidaminov M.I., Shornikova O.N., Sorokina N.E., Avdeev V.V. Sposob polichenya intercalirovannogo grafita, intercalirovannyi grafit i grafitovyie listyi [Method for producing intercalated graphite Intercalated graphite and flexible graphite sheet]: Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2010104530/03 (2011)
6. Sorokina N.E., Avdeev V.V. Sposob polichenya intercalirovannogo grafita [Method for obtaining intercalated graphite]: Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2010104533/05 (2011)
7. Shornikova O.N., Sorokina N.E., Petrov D.V., Maksimova N.V., Sviridov A.A., Godunov I.A., Seleznev A.N., Avdeev V.V. Sposob polichenya intercalirovannogo grafita [Method for obtaining intercalated graphite]: Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2009136509/05 (2009)
8. Maksimova N.V. Interkalirovanie grafita v sistemah $C - HNO_3 - R$, where $R = CH_3COOH, H_3PO_4, H_2SO_4$ [Intercalation of graphite in systems $C - HNO_3 - R$, where $R = CH_3COOH, H_3PO_4, H_2SO_4$] Ph. D. thesis. 2002, 168p.
9. Shornikova O.N. Modificirovannyi interkalirovannyi grafit i penografit na ego osnove: poluchenie i svoystva [Modified intercalated graphite and foam graphite based on it: production and properties] Ph. D. thesis: 2008, 24 p.
10. Metz V., Zimsgluss L. Studies of the kinetics of graphite intercalation with $FeCl_3$ vapors: *Matem. scientific and English*. – 1977. – T.31. – pp. 119-121
11. Lalancette J.M., Roy L., Lafontaine J. Metals intercalated into graphite. IV. Intercalation from CCl_4 solution and extraction of intercalated particles. – *Can. J. Him.* – 1976. – T.54. – S.2505-2508

12. Shornikova O.N., Sorokina N.E., Avdeev V.V., Nikolskaya I. I. Sposob polichenya penografita, modifirovannogo oksidami metallov, triady zheleza, i penografit [The method of obtaining foam graphite modified with iron triad metal oxides and foam graphite]: Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2008132984/03;

13. Mohandas K.S., Sanil N., Noel M., Rodriguez P. Electrochemical intercalation of aluminum chloride into graphite in molten sodium chloraluminat. Carbon. – 2002. – Т.41. – No. 5. S.927-932.

14. Inagaki M., Wang Z.D., Sakakibara J. Differential thermal analysis of intercalation reactions in molten salts. Synthesis. We met. – 1989. – Т.31. – S.319-326.

15. Scharff P. Upon the formation on the bi-intercalation compound with nitric and sulfiiric acid // Materials Science Forum. 1992. Vol. 91-93. P. 23-28.

16. Press M.D., Savoctyanova N. A., Urvovskiy I.M. Vzaimodejstvie kristallicheskogo grafita so smes'yu koncentrirovannyh sernoj i azotnoj kislot [Interaction of crystalline graphite with a mixture of concentrated sulfuric and nitric acids] Ph. D. thesis Moscow, 1989, 131p.

Об авторах

Терещенко Михаил Дмитриевич (Пермь, Россия) – студент, кафедра «Технология полимерных материалов и порохов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: mishater1@yandex.ru).

Ябуров Михаил Иванович (Пермь, Россия) – студент, кафедра «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: iburovgm@yandex.ru).

Лукоянов Владимир Юрьевич (Пермь, Россия) – студент, кафедра «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: urvlaluk@bk.ru).

Хименко Людмила Леонидовна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология полимерных материалов и порохов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: lhimenko@yandex.ru).

About the authors

Mikhail D. Tereshchenko (Perm, Russian Federation) – Student of the department of Technology of Polymeric Materials and Gunpowders, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: mishater1@yandex.ru).

Mikhail I. Yaburov (Perm, Russian Federation) – Student of the Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: iburovgm@yandex.ru).

Vladimir Yu. Lukoyanov (Perm, Russian Federation) – Student of the Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: urvlaluk@bk.ru).

Lyudmila L. Khimenko (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technology of Polymer Materials and Powders, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: lhimenko@yandex.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 28.10.2022

Одобрена: 30.11.2022

Принята к публикации: 05.12.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Терещенко, М.Д. Обзор существующих методов получения интеркалированного графита / М.Д. Терещенко, М.И. Ябуров, В.Ю. Лукоянов, Л.Л. Хименко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 71. – С. 174–181. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.71.19

Please cite this article in English as: Tereshchenko M.D., Yaburov M.I., Lukoyanov V.Yu., Himenko L.L. Review of the existing methods for intercalating graphite. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2022, no. 71, pp. 174–181. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.71.19