

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №7 (133). С. 9-16.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №7 (133). P. 9-16.

Научная статья
УДК 621:681.51
doi: 10.30987/2223-4608-2022-1-7-9-16

Комплексы мехатронного оборудования для аддитивного производства крупногабаритных изделий

Михаил Львович Хейфец¹, д.т.н.,
Вячеслав Сергеевич Крутько², гл. конструктор,
Николай Леонидович Грецкий³, нач. отдела,
Диана Сергеевна Ратуцкая⁴, ведущий инженер
^{1,3,4}Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь
^{2,3,4}АО «НПО Центр» НАН Беларуси, Минск, Беларусь
¹ mlk-z@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6942-3605>
² vkrutko@npocenter.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>
³ nikolay_gnl@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>
⁴ DRatutskaya@npocenter.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Рассмотрено проектирование процессов листового раскроя и его послойной сборки для производства крупногабаритных металлических изделий. Приведен анализ применения формовочных смесей и технологий создания в аддитивном производстве крупногабаритных строительных конструкций. Проанализирован выбор автоматизированных приводов для механизмов перемещения в технологическом комплексе послойного синтеза строительных конструкций.

Ключевые слова: аддитивное производство, технологическое оборудование, раскройный комплекс, 3D-принтер, FDM-печать, формовочные смеси

Для цитирования: Хейфец М.Л., Крутько В.С., Грецкий Н.Л., Ратуцкая Д.С. Комплексы мехатронного оборудования для аддитивного производства крупногабаритных изделий // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №7 (133). – С. 9-16. doi: 10.30987/2223-4608-2022-1-7-9-16

Original article

Mechatronic equipment systems for additive manufacturing of large-dimensioned products

Mikhail L. Kheifetz¹, Dr.Sc.Tech.,
Vyacheslav S. Krutko², Chief designer,
Nikolai L. Gretskiy³, Department Manager,
Diana S. Ratutskaya⁴, Lead Engineer
^{1,3,4}Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
^{2,3,4}Open Joint Stock Company «NPO Center» of NAS Belarus, Minsk, Belarus
¹ mlk-z@mail.ru, ² vkrutko@npocenter.com, ³ nikolay_gnl@mail.ru, ⁴ DRatutskaya@npocenter.com

Abstract. The design of nesting pattern and its layer-by-layer assembly for the production of large-dimensioned metal products is viewed. The analysis of the use of molding compounds and technologies for creating large size building constructions in additive manufacturing is given. The choice of automatically-controlled drives for transfer mechanisms in the technological complex of layer-by-layer synthesis in building constructions is studied.

Keywords: additive manufacturing, technological equipment, cutting complex, 3D printer, FDM printing, molding compounds

For citation: Kheifetz M.L., Krutko V.S., Gretskiy N.L., Ratutskaya D.S. Mechatronic equipment systems for additive manufacturing of large-dimensioned products. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.7 (133), pp. 9-16. doi: 10.30987/2223-4608-2022-1-7-9-16

Введение

При разработке технологического оборудования, использующего концентрированные и распределенные потоки энергии в автоматизированном производстве, недостаточно соответствующих принятым расчетным схемам традиционных стадий проектирования [1 – 3]. Связано это с тем, что для традиционного и нового аддитивного производства, заключающегося в послойном наращивании поверхности изделий, требуется рассматривать дополнительно схемы и выделять модули технологического оборудования, описывающие подвод материала и энергии [1, 4, 5].

Создание формы изделия в аддитивных технологиях происходит путем добавления материала, с использованием концентрированных источников энергии и распределенных полей, в отличие от традиционных технологий механической обработки, основанных на удалении «лишнего» материала [1, 2, 6]. Широко применяемые в мировом производстве технологии, позволяющие для высокопроизводительного аддитивного производства крупногабаритных изделий, связанного с повышенным расходом материала заключить, что наиболее перспективно применение оборудования по послойному синтезу и наращиванию слоев, формообразованию поверхностей изделий, использующего различные сочетания материалов и источников энергии [1, 6]. Это в свою очередь ставит задачи распределения компонентов материалов и потоков энергии не только по заданному контуру или поверхности, но и по глубине от поверхности изделия, а также по характеру подачи энергии и материала [1, 2, 5, 6].

Проектирование комплексов мехатронного оборудования в цифровизированном производстве

Если рассматривать технологическое оборудование с позиций компьютеризации производственной деятельности, то такое оборудование, его узлы и детали следует проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ [1, 6]. Поэтому, требуется дополнительно изучать схемы числового программного управления, с учетом контуров прямых и обратных связей в технологической системе, рассматривая

комплекс технологического оборудования как мехатронную систему [2, 4].

Мехатронные системы включают механическую, электромеханическую, электронную и управляющую (использующую компьютеры и микропроцессоры) части [2 – 5]. В нее входят: датчики состояния как внешней среды, так и самой системы управления; источники энергии; исполнительные механизмы; усилители; вычислительные элементы (компьютеры и микропроцессоры). Система представляет собой единый комплекс электромеханических и электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется непрерывный обмен энергией и информацией.

Функционально простую мехатронную систему технологического комплекса (ТК) делят на следующие составные части: исполнительные устройства (объект управления и приводы); информационные устройства (датчики внутреннего состояния системы и датчики состояния внешней среды) и систему управления (компьютер и микропроцессоры). Взаимодействие между этими частями, реализующее прямые и обратные связи в системе, осуществляется через устройство сопряжения (интерфейс) [1 – 5]. Обобщенная схема производственного модуля в цифровизированном производстве должна содержать все необходимые составляющие мехатронной системы: объекты управления; приводы; датчики; управляющие устройства, сопряженные между собой; систему программного обеспечения.

Таким образом, структурная схема любого производственного модуля, использующего концентрированные источники энергии, должна иметь рассмотренные элементы, чтобы обеспечить модулю длительное время устойчивой работы в автономном режиме, используя минимальное количество управляющих воздействий.

В результате дополнительные этапы проектирования комплексов технологического оборудования как для автоматизированного традиционного, так и нового аддитивного производства должны включать [2 – 4]:

- выбор источников энергии и материалов для интенсификации процессов и анализ реологии технологической среды, использующей потоки энергии;

- выделение прямых и обратных связей в технологической системе при электрофизических и термомеханических воздействиях;

– структурный и параметрический анализ открытой производственной системы и синтез технологических комплексов, использующих источники энергии;

– компоновку производственных модулей и формирование адаптивной мехатронной системы высокоэффективной обработки.

Проектирование оборудования для аддитивного производства крупногабаритных изделий, требующих большого расхода материалов, рассмотрим для металлических, полимерных и силикатных композиций, с учетом разнообразных технологий, использующих различные источники энергии.

Проектирование оборудования для листового раскроя и сборки металлических изделий

Разработка технологических комплексов производства крупногабаритных изделий из металлических материалов начинается с анализа принципиальной схемы мехатронной системы, имеющей два контура управления, посредством прямой связи с внешней средой и обратной связи по результатам диагностики состояния объекта управления [2, 4]. Мехатронный технологический комплекс реализует прямую связь при управлении потоком энергии или материала послойно синтезирующего изделие, а обратную связь по состоянию формируемого слоя или обрабатываемой поверхности сформированного изделия [1, 6].

Анализ потоков энергии и материалов для послойного синтеза изделия осуществлялся в зависимости от свойств материалов или их композиций, геометрических характеристик поверхностей. При этом особое внимание уделялось фокусировке или распределению потоков в пространстве и во времени. Выбор источников для раскройного оборудования определялся как толщиной и материалом листовых заготовок, так и точностью обработки.

Определение достижимой точности формирования поверхностей, с позиций влияния плотности мощности применяемых концентрированных потоков энергии, позволило рекомендовать ряд источников энергии для использования в раскройном оборудовании [1, 2, 6]. Практически непрерывный ряд по точности в зависимости от плотности мощности обеспечивают следующие технологические источники: газовое пламя и плазменная дуга, сварочная дуга и искровые разряды, непрерывный и импульсно-периодический лазеры. Это, в

зависимости от решаемых задач, обусловило достаточно активное применение в раскройном оборудовании: газо-пламенных, плазменных, электроискровых (электро-эрозионных), лазерных источников энергии.

Рассматривался граф кортежей различных видов обработки проектируемого технологического оборудования и анализировались налагаемые связи: механические и электрические (привода и источники), электронные и программные (средства контроля и управления) в мехатронной системе [2 – 4]. В результате анализа привод плазменного источника реализован в качестве многокоординатного манипулятора.

Спроектированный на ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси технологический комплекс (рис. 1) позволяет производить как резку, так и последующую послойную листовую сборку готового изделия посредством сварки по контуру плазменной сварочной головкой фирмы Kjellberg (рис. 2).



Рис. 1. Технологический комплекс плазменного раскроя материала с манипулятором для резки и разделки кромок заготовок под углом

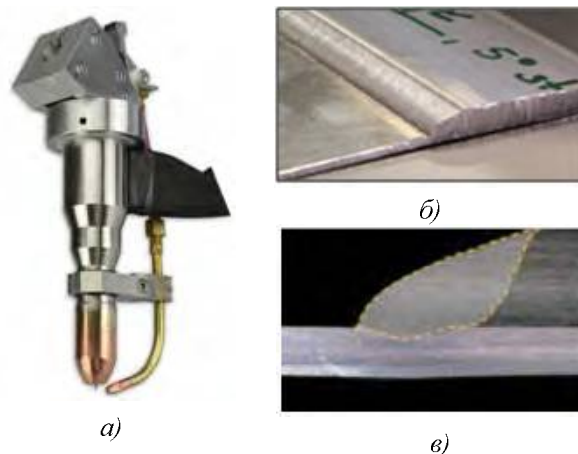


Рис. 2. Оборудование для плазменной сварки: а – сварочная головка Kjellberg; б – послойная сварка изделия; в – сечение сварочного шва (информация с сайта www.kjellberg.de)

Анализ связей технологической системы по критериям струйных течений позволил спроектировать оборудование для гидроабразивной резки (рис. 3) и расширить круг его возможностей за счет применения манипулятора для поворотной системы (рис. 4).



Рис. 3. Технологический комплекс гидроабразивной резки



Рис. 4. Поворотная система сопла гидроабразивной резки

Для повышения качества поверхности формируемого изделия и снижения длительности процесса производства анализировались формы заготовок применяемых материалов. В результате предложен алгоритм рационального разбиения на слои, с учетом оценки качества поверхности, зависящей от формы изделия [1, 2, 6]. Анализ разбиения в различных методах послойного синтеза обеспечивает выбор наиболее рациональных процессов макетирования и производства конкретного изделия.

По результатам анализа для технологии LOM (Laminated Object Manufacturing) – послойного формирования из листового материала, с целью

повышения точности геометрической формы, рекомендован алгоритм разбиения изделия на слои различной толщины, учитывающий разделку их кромок под углом. По предложенному алгоритму рассмотрено компьютерное проектирование процессов листового раскроя и послойной сборки, на примерах формирования изделий сложной геометрии, с учетом использования 5- координатного манипулятора в автоматизированном раскройном комплексе.

Проектирование оборудования для экструзионной печати крупногабаритных изделий

Для печати крупногабаритных изделий специальными пластиками разработана компоновочная схема 3D-принтера жесткой конструкции (рис. 5).



Рис. 5. Компоновочная схема механических и электромеханических узлов 3D-принтера

По компоновочной схеме изготовлен макет 3D-принтера с печатным узлом, позволяющим обрабатывать режимы печати специальными пластиками с температурой экструзии 180...410 °С и нагревом рабочего стола до 180°С (рис. 6).

В результате выполнения основных этапов проектирования мехатронных технологических комплексов проведен синтез механических и электромеханических составляющих (экструдера в сборе с печатающей головкой и стола в сборе с нагревательным элементом). Собраны электронные компоненты системы: импульсный блок питания; драйверы шаговых двигателей

перемещения по осям X - Y - Z и экструдера – DRV8825; графический LCD дисплей 12864 на базе контроллера ST7920; платы управления Arduino Mega 2560 R3 и платы расширения RAMPS 1.4. Из составляющих собран 3D-принтер для печати крупногабаритных изделий композиционными полимерными материалами (рис. 7).



Рис. 6. Печатный узел в сборе

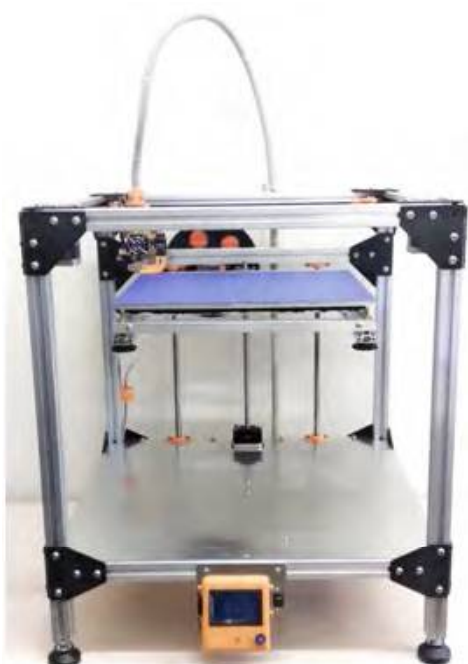


Рис. 7. 3D принтер для FDM-печати композиционными полимерными материалами

По результатам эксплуатации 3D-принтера обоснован выбор композиционных материалов для послойного синтеза сложно профильных изделий (рис. 8).



Рис. 8. Шнек для подачи формовочных смесей в строительном 3D-принтере

Проектирование оборудования для послойного синтеза изделий из строительных смесей

Технологические комплексы послойного синтеза для производства строительных конструкций из неметаллических композитов, с учетом специфики выпускаемых изделий, отличаются широким многообразием предложенных и успешно реализуемых схем.

Среди применяемых неметаллических композитов в аддитивном производстве послойного синтеза строительных конструкций наибольшее распространение получили формовочные смеси на основе цемента быстротвердеющих бетонов и строительных растворов. Для получения необходимых технологических свойств, применяемых материалов требуется одновременное использование различных по своему составу и назначению химических добавок, обеспечивающих корректировку прочности, пластичности, жесткости, плотности и др. свойств рабочей смеси.

Введение в состав бетона или строительного раствора химических добавок в виде отдельных компонентов или их композиции позволяет повысить эксплуатационные показатели

материала [7]. Для обеспечения соответствия строительных растворов требованиям аддитивного процесса формования, они должны характеризоваться высокой скоростью схватывания и твердения цементного теста, повышенной подвижностью и низким водопотреблением.

Действие ускорителей схватывания и твердения бетонов и строительных растворов заключается, главным образом, в уменьшении электрических зарядов частиц цемента, что позволяет активизировать процесс гидратации трехкальциевого алюмината в нем и уплотнить структуру цементного камня в ранние сроки ее формирования [8]. Оптимальный расход ускорителей схватывания и твердения бетонов при приготовлении бетонов и строительных растворов составляет 1...3 % от массы сухого цемента и зависит от химического состава последнего, свойств наполнителей, требований к готовым изделиям, наличия в них арматуры.

Технологический комплекс послойного синтеза изделий из неметаллических композитов должен отличаться высокой степенью автоматизации. Требования к надежности технологического оборудования обусловлены тем, что в большинстве случаев отказы в работе приводят к нарушению технологического процесса, браку и простоям строительного производства.

В ОАО «НПО Центр» предложен порталный технологический комплекс послойного синтеза изделий из неметаллических композитов (рис. 9).

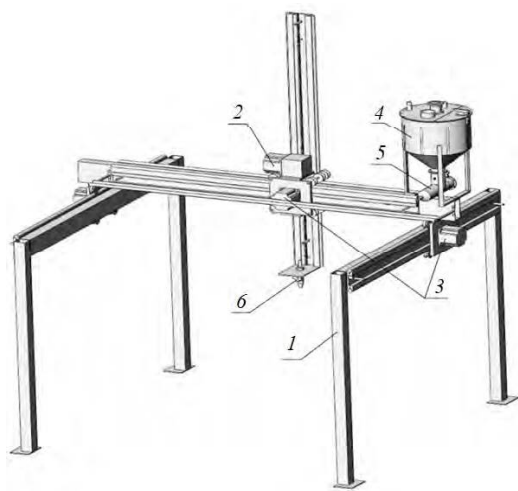


Рис. 9. Портальный технологический комплекс послойного синтеза строительных конструкций:
1 – порталная рама; 2, 3 – механизмы перемещения;
4 – дозатор; 5 – подающее устройство; 6 – рабочий орган

Комплекс состоит из порталной рамы 1, механизмов перемещения 2, 3 и дозатора, который представляет собой конструкцию, состоящую из емкости 4 для приготовленного композитного состава (смеси), подающего устройства 5 и рабочего органа 6.

Объем смеси в емкости контролируется датчиками и пополняется по трубе из резервуара насосом. При опускании уровня смеси ниже допустимого открывается клапан и включается насос подачи, после достижения верхнего уровня насос отключается и закрывается клапан. Для поддержания однородности смеси, внутри емкости расположена лопастная мешалка, поскольку однородность массы является крайне важным обстоятельством для точной дозировки смеси и качества получаемого изделия.

Рабочий орган представляет собой сопло для подачи композитного материала с клапаном. Клапан рабочего органа открывается, когда привод горизонтального перемещения совершает движение по рабочей траектории, при ее окончании клапан закрывается и выдавливание массы прекращается, а горизонтальный привод продолжает движение по заданной траектории. Таким образом, обеспечивается точное дозирование массы и позиционирование дозатора на заданной траектории.

В качестве механизмов перемещения технологического комплекса применяются приводы горизонтального и вертикального движения рабочего органа. Привод механизмов перемещения выполнен в виде зубчатой рейки, тем самым проскальзывание сведено к минимуму.

Привод вертикального движения осуществляет позиционирование рабочего органа относительно рабочей точки, т.е. там, где осуществляется начало подачи смеси, и подъем к исходному положению по завершению печати слоя. Положение вертикальной составляющей рабочего органа постоянно в течении печати каждого слоя и контролируется датчиком положения двигателя. В связи с широким ассортиментом используемых материалов толщина печатаемого слоя различна, а следовательно, положение рабочей точки разное, что учитывается при подготовке управляющей программы.

Привод горизонтального движения позиционирует рабочий орган в горизонтальной

плоскости по заданной траектории печатаемого слоя, при этом открывается и закрывается клапан подачи смеси на заданных участках траектории, а привод подающего устройства осуществляет требуемое дозирование смеси. Движение данного привода контролируется датчиком положения и согласуется с управляющей программой [9].

В результате сравнительного анализа и выбора типов электродвигателей для механизмов перемещения показано, что каждый из рассмотренных типов двигателей имеет рациональную область применения. Асинхронный электродвигатель используется для тягового, силового привода. Шаговый двигатель – в маломощных системах, таких как расход материала и др. [10]. В наибольшей степени требованиям технологического комплекса удовлетворяет синхронный электродвигатель, который наряду с высокими электрическими и электромеханическими показателями обладает лучшей управляемостью и точностью позиционирования.

Заключение

Таким образом, рассмотрены методы аддитивного формообразования крупногабаритных изделий из композиционных материалов, построенные на использовании потоков энергии и материалов, а также методы автоматизации и компьютерного управления процессами производства изделий.

Для производства крупногабаритных металлических изделий рассмотрено проектирование процессов листового раскроя и послойной сборки, с учетом использования манипулятора в автоматизированном раскройном комплексе. Рекомендован алгоритм разбиения изделия на слои различной толщины, учитывающий разделку их кромок под углом, для технологии послойного формирования изделия из листового материала.

Разработана компоновочная схема и проведен синтез механических, электромеханических составляющих и электронных компонентов 3D-принтера жесткой конструкции для экструзионной печати крупногабаритных изделий повышенной точности.

Проведен анализ применяемых строительных смесей и технологий создания в аддитивном производстве крупногабаритных конструкций. Показана компоновка технологического

комплекса для строительного производства и рассмотрены его основные механизмы. Проведен выбор автоматизированных приводов для механизмов перемещения в технологическом комплексе послойного синтеза строительных изделий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Витязь, П.А., Хейфец, М.Л., Чижик, С.А.** Состояние и перспективы развития технологических комплексов аддитивного производства изделий из композиционных материалов // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2017. – №7 (73). – С. 42-48.
2. **Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А.М. Русецкий и др.; под общ. ред. А.М. Русецкого.** – Минск: Беларуская навука, 2012. – 239 с.
3. **Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий и др.; под общ. ред. А.М. Русецкого.** – Минск: Беларуская навука, 2014. – 316 с.
4. **Автоматизация и управление в технологических комплексах / А.М. Русецкий и др.; под общ. ред. А.М. Русецкого.** – Минск: Беларуская навука, 2014. – 375 с.
5. **Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / С.А. Чижик и др.; под общ. ред. М.Л. Хейфеца.** – Минск: Беларуская навука, 2019. – 248 с.
6. **Чижик, С.А., Хейфец, М.Л., Филатов, С.А.** Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2014. – №4 (29). – С. 68-74.
7. **Изотов, В.С., Соколова, Ю.А.** Химические добавки для модификации бетона. – М.: Палеотип, 2006. – 244 с.
8. **Афанасьев, Н.Ф., Целуйко, М.К.** Добавки в бетоны и растворы. – К.: Будивэльныйк, 1989. – 128 с.
9. **Системы автоматизированного управления электроприводами / Г.И. Гульков, Ю.Н. Петренко и др.; под общ. ред. Ю.Н. Петренко.** – Мн.: Новое знание, 2004. – 284 с.
10. **Фираго, Б.И., Павлячик, Л.Б.** Теория электропривода. – Мн.: Техноперспектива, 2007. – 585 с.

REFERENCES

1. Vityaz, P.A., Heifets, M.L., Chizhik, S.A. State and outlooks in development of technological complexes of composite product additive production / *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2017, no.7 (73), pp. 42-48.
2. Theoretical fundamentals of technological complexes design / A.M. Rusetsky [et al.]; under the general editorship of A.M. Rusetsky. Minsk: Belorusskaya navuka, 2012, 239 p.
3. Design and equipment of technological complexes / A.M. Rusetsky [et al.]; under the general editorship of technological complexes. Ed. A.M. Rusetsky. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2014. 316p.
4. Automation and control in technological complexes. Ed. A.M. Rusetsky. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2014. 375p.
5. Ensuring the quality of products in technological

complexes. Ed. M.L. Kheifetz. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2019. 248p.

6. Chizhik, S.A., Heifets, M.L., Filatov, S.A. Outlooks in technological complex development for additive synthesis of composites and product shaping / Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials, 2014, no.4 (29), pp. 68-74.

7. Izotov V.S., Sokolova Yu.A. Chemical additives for concrete modification. Moscow: Paleotype, 2006, 244 p.

8. Afanasyev N.F., Tseluiko M.K. Additives to concrete and mortars. Kyiv: Budivelnik, 1989, 128 p. (in Russian)

9. Automated control systems of electric drives / G.I. Gulkov, Yu.N. Petrenko, [et.al.]; under the general editorship of Yu.N. Petrenko / Minsk: Novoe Znanie publ., 2004, 284 p.

10. Firago B.I., Pavlyachik L.B. Electric Drive Theory / Minsk: Tekhnoperspektiva Publ., 585 p. (in Russian)

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.05.2022; одобрена после рецензирования 16.05.2022; принята к публикации 20.05.2022.

The article was submitted 01.05.2022; approved after reviewing 16.05.2022; assepted for publication 20.05.2022.

