

Установка для шелушения рапса в электромагнитном поле сверхвысокой частоты

Н.Н. Кучин¹, Н.В. Цугленок², В.Ф. Сторчевой³, А.В. Сторчевой⁴

¹ Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Российская Федерация;

² Восточно-Сибирская ассоциация биотехнологических кластеров, Красноярск, Российская Федерация;

³ Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация;

⁴ Российский биотехнологический университет, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Существующие заводы могут перерабатывать до 12 т не шелушённых семян рапса в сутки, производя из каждой тонны семян 40% масла для дизельного топлива и 60 % жмыха с содержанием до 20 % масла. Шелушённые семена рапса необходимо использовать для изготовления пищевого масла. Качественное шелушение семян рапса с отделением лузги и сохранением целостности ядра остаётся нерешённой проблемой.

Цель работы — разработка установки для шелушения семян рапса в электромагнитном поле сверхвысокой частоты при гидромеханическом разрушении и истирании оболочек.

Материалы и методы. Шелушение семян рапса происходит: за счёт гидромеханического разрушения (увлажнения оболочки для сохранения прочности ядра, однократного удара для разрушения прочности связей оболочек и ядра); истирания оболочек в результате трения о вращающийся конус конденсаторной части квазитороидального резонатора и взаимного трения семян в электромагнитном поле сверхвысокой частоты с последующим удалением оболочек за счёт продувки семян воздушным потоком.

Результаты. Сырьё транспортируется воздухом в приёмную ёмкость, где увлажняется. Затем увлажнённые семена через радиопрозрачную воронку, расположенную в конденсаторной части квазитороидального резонатора, попадают на поверхность ротора, подвергаются многократному ударному воздействию, интенсивному трению об абразивную поверхность. В результате этого оболочки семян рапса отделяются от ядер. Ядра падают вниз и выводятся через ёмкость. Легкие частицы удаляются воздухом через пневмосепарирующий канал. В осадочной камере происходит разделение тяжёлых отложений и легких примесей. В оболочке семян рапса появляются микротрещины, что облегчает её отделение от ядра. Количество и скорость поглощения влаги зависят от температуры эндогенного нагрева компонентов семян рапса. При повышении температуры возрастает кинетическая энергия молекул воды и, следовательно, интенсивность влагопереноса в оболочке.

Заключение. Согласно расчётам, напряжённость электрического поля в резонаторе достигает 15 кВ/см, что позволяет при окружной скорости ротора 18–20 м/с увеличить температуру диэлектрического нагрева семян рапса на 15–20 °С и способствует отделению увлажнённой оболочки от ядра семян. При мощности электропривода ротора 4,2 кВт, частоте вращения 750 об/мин, мощности магнетронов 3,3 кВт, производительность установки составит 150 кг/ч, а энергетические затраты 0,05 кВт·ч/кг. Достоинства шелушителя с СВЧ энергоподводом в квазитороидальный резонатор: высокая технологическая эффективность и сравнительно малый расход электроэнергии. Эндогенное тепло усиливает процесс набухания оболочек. Возникающие внутренние сдвиги облегчают процесс отделения оболочек от ядер рапса, а тепловой фактор позволяет сокращать продолжительность отделения.

Ключевые слова: абразивный материал; квазитороидальный резонатор; конический ротор; отделение лузги от ядра.

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Кучин Н.Н., Цугленок Н.В., Сторчевой В.Ф., Сторчевой А.В. Установка для шелушения рапса в электромагнитном поле сверхвысокой частоты // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 2. С. x-y. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-629272>

Рукопись получена: 04.03.2024 Рукопись одобрена: 01.04.2024 Опубликована online: 30.04.2024

The facility for rapeseed peeling in the ultrahigh frequency electromagnetic field

Nikolay N. Kuchin¹, Nikolay V. Tsuglenok², Vladimir F. Storchevoy³, Alexander V. Storchevoy⁴

1 Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russian Federation;

2 East Siberian Association of Biotechnological Clusters, Krasnoyarsk, Russian Federation;

3 Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation;

4 Russian Biotechnological University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Well-known plants can process 12 tons of unpeeled rapeseed per day, producing 40% of oil for diesel fuel and 60% of cake with the oil content up to 20% from each ton of seeds. To produce edible oil, peeled rapeseed seeds should be used. The problem of high-quality peeling of rapeseed with separation of the husk from the kernel and the preservation of the integrity of the kernel remains unresolved.

AIM: Development of the facility for rapeseed seeds peeling in the ultrahigh frequency electromagnetic field in the process of hydromechanical destruction and abrasion of husk.

METHODS: Peeling of rapeseed seeds occurs:

- due to hydromechanical destruction (moistening of the husk to preserve strength of the kernel, a single impact to destroy the strength of the bonds between the husk and the kernel);
- due to abrasion of the husk as a result of friction against the rotating cone of the condenser part of the quasi-toroidal resonator and mutual friction of the seeds in the ultrahigh frequency electromagnetic field.

RESULTS: The flow of the initial rapeseed seeds is transported with the airflow into the receiving container, where it is moistened. Then, the moistened seeds follow through the radio-transparent funnel located in the condenser part of the quasi-toroidal resonator, fall on the surface of the rotor, and are subjected to repeated impact, intense friction against the abrasive surface. As a result, the husk of rapeseed seeds is separated from the kernel. The kernels fall down and are discharged through the container. Light particles are removed with the airflow through a pneumatic separation channel. In the sedimentary chamber, heavy tins are separated from light impurities. Microcracks appear in the husk of rapeseed seeds, which facilitates separation from the kernel. The amount and rate of moisture absorption depends on the temperature of endogenous heating of rapeseed seeds. As the temperature rises, the kinetic energy of the water molecules increases and, consequently, the intensity of moisture transfer in the husk increases as well.

CONCLUSIONS: Calculations show that the electric field strength in the resonator reaches up to 15 kV/cm, which makes it possible to increase the temperature of dielectric heating of rapeseed seeds by 15-20 °C at a circumferential rotor speed of 18-20 m/s and promotes the separation of the moistened husk from the seed kernel. With an electric rotor drive power of 4.2 kW, a rotation speed of 750 rpm, and a magnetron power of 3.3 kW, the facility capacity is 150 kg/h. Energy costs are 0.05 kWh/kg. Advantages of the microwave-powered husker with a quasi-toroidal resonator are high technological efficiency and relatively low power consumption. Endogenous heat enhances the process of husk swelling. The resulting internal shifts facilitate the process of separating the husk from the rapeseed kernel, and the thermal factor makes it possible to shorten the duration of separation of the husk from the kernel.

Keywords: abrasive material; quasi-toroidal resonator; conical rotor; separation of the husk from the kernel.

TO CITE THIS ARTICLE:

Kuchin NN, Tsuglenok NV, Storchevoy VF, Storchevoy AV. The facility for rapeseed peeling in the ultrahigh frequency electromagnetic field. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(2):x-y. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-629272>

Received: 04.03.2024 Accepted: 01.04.2024 Published online: 30.04.2024

ВВЕДЕНИЕ

Общемировой сбор семян рапса в среднем за последние годы составляет 70–75 млн. т. В Нижегородской области в ООО «Завод растительных масел» для получения рапсового масла ежедневно перерабатывают 100 тонн семян рапса, а в фермерских хозяйствах 1–5 т/сутки. В среднем по России рапсового масла производится до 1 т/ч. Технологическая линия включает нагреватели (ГН-1000, 24 кВт), два прессы для отжима (РР-500, 44 кВт), экструдер (Е-1000 R, 92,5 кВт), винтовой питатель (SF-250, 1,1 кВт), шнековый пресс для окончательного отжима (РР-100, 46,5 кВт), охладитель (О-1000, 4,5 кВт). Общая мощность линии 213 кВт. В Сеченовском районе Нижегородской области работает завод по переработке семян рапса. Завод может перерабатывать **не шелушённые семена рапса** до 12 тонн в сутки, производя из каждой тонны семян 400 кг масла (40%) и 600 кг жмыха с 20 %-ным содержанием масла, который идет на корм скоту, а масло используют в качестве дизельного топлива¹. Для производства пищевого рапсового масла необходимо шелушить семена рапса в условиях фермерских хозяйств.

Существующие способы и машины для шелушения, предназначенные для зерновых культур, невозможно использовать для семян рапса из-за особой структуры и физико-механических свойств (хрупкость, низкая влажность — 4 %, мелкие семена — 1 мм). Такие машины представляют собой комбинации шелушителя и аспиратора для отделения лузги. Недостаток шелушительных машин — это высокий расход электроэнергии (до 75 кВт·ч на шелушение 1 т зерна).

Известна установка для шелушения рапса в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (ЭМПСВЧ), состоящая из двух модулей [1]. Первый модуль предназначен для отволаживания семян рапса. Второй модуль представлен в виде цилиндрического перфорированного резонатора в экранирующем корпусе с поярусно расположенными электроприводными дисками из мелкозернистого абразивного материала и полым диэлектрическим валом для циркуляции воздуха.

Кроме того, существует установка с тремя поярусно расположенными модулями [2]. Первый модуль обеспечивает распыление воды. Второй модуль представлен виде цилиндрического резонатора с соосно расположенным электроприводным фторопластовым шнеком, винты, которых покрыты мелкозернистым абразивным материалом. В третьем модуле расположены лопасти вентилятора, покрытые также абразивным материалом.

Недостатки. В обеих установках (двухмодульная и трехмодульная) с СВЧ энергоподводом в цилиндрический резонатор — это трудности согласования режимных параметров каждого модуля. Отсюда дробление ядра и потери.

Аналогом является воздушный сепаратор РЗ-БСД, предназначенный для выделения примесей, отличающихся от зерна аэродинамическими свойствами, и для отделения транспортирующего воздуха от зерна [3]. Отдельные узлы сепаратора позволяют реализовать движения семян рапса и циркуляцию воздуха, но нет узлов, позволяющих шелушить семена рапса с отделением лузги от ядра.

Возникает *проблема* осуществления качественного шелушения рапса с отделением лузги от ядра и сохранением его целостности. Основное направление совершенствования шелушителя семян рапса заключается в определении рациональных размеров и формы резонаторов с вращающимся ротором с регулировкой скорости.

Целью настоящей работы является разработка и обоснование параметров установки для шелушения семян рапса в ЭМПСВЧ при гидромеханическом разрушении и истирании оболочек.

Задачи исследования:

1. Изучить существующие технологии и технические средства, применяемые для шелушения семян рапса.
2. Разработать установку, реализующую совмещение процессов гидромеханического разрушения и истирания оболочек семян рапса при воздействии ЭМПСВЧ для снижения выхода дробленых фракций.

Научной новизной обладают: способ шелушения семян рапса, совмещённый с микроволновой технологией, позволяющий максимально отделить лузгу от ядра с сохранением его целостности; конструктивное исполнение установки с квазитороидальным резонатором, обеспечивающим совмещение способов шелушения многократного удара и истирания увлажнённых оболочек рапса с процессом

¹ Первый завод по переработке рапса в Нижегородской области [videoblog] Дата обращения: 03.03.2024. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=5OQbpg2gh-Y>

воздействия ЭМП СВЧ.

Основная идея, принцип работы и конструкция установки базируется на том, что в квазиторoidalном резонаторе происходит совмещение нескольких процессов, а именно: распыление воды на поверхность семян рапса в загрузочной ёмкости; отволаживание в направляющей радиопрозрачной воронке; многократный удар и истирание увлажнённых оболочек рапса в электроприводном распределительном конусе, покрытым мелкозернистым абразивным материалом; воздействие электромагнитного поля сверхвысокой частоты высокой напряжённости электрического поля.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом настоящего исследования является сверхвысокочастотная установка с квазиторoidalным резонатором (см. рис. 1), обеспечивающим гидротермическую обработку семян рапса, снижающую хрупкость эндосперма, и многократный удар и интенсивное истирание оболочек, снижающие выход дроблёных фракций. В установке с учётом строения семян рапса, прочности связей оболочек и ядра, прочности ядра реализованы указанные способы шелушения, позволяющие получить как можно больше ядер при малой их дробимости. Эти способы применимы для семян рапса, у которых оболочка не срослась с ядром, но само ядро достаточно хрупкое, требующее увеличения пластичности, чтобы при ударе оно не дробилось.

Радиус ферромагнитного наружного цилиндра 11 подбирается так, чтобы на частоте 2450 МГц конденсаторная часть 8 работала в режиме отсечки. Зазор в конденсаторной части квазиторoidalного резонатора должен быть кратен четверти длины волны. Размеры квазиторoidalного резонатора следующие: конденсаторный зазор — 15,3 см; диаметр внутреннего цилиндра — 48,96 см; диаметр внешнего и высота наружного цилиндра — 61,2 см.

При проектировании квазиторoidalных резонаторов учитывали особенности электромагнитного поля сантиметрового диапазона (длина волны 12,24 см), а именно: объем должен быть достаточно большим, чтобы обрабатывать значительное количество семян рапса и полностью использовать мощность генераторов; линейные размеры квазиторoidalного резонатора не должны превышать в 5–7 раз длину волны. Уменьшение линейных размеров квазиторoidalного резонатора, превышающих в 1–2 раза длину волны 12,24 см, приводит к снижению запаса энергии и уменьшению собственной добротности. Применять объемные резонаторы, размеры которых в 8–10 раз больше длины волны, нецелесообразно из-за возбуждения в них большого числа колебаний. В этом случае резонансные свойства утрачиваются [4], суммарное поле становится неравномерным.

Электродинамические параметры (напряженность электрического поля и собственная добротность) квазиторoidalного резонатора, кратного по размерам 5–7 длинам волны 12,24 см, определяли теоретическими формулами [5, 6].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установка для шелушения семян рапса в ЭМП СВЧ (см. рис. 1) содержит квазиторoidalный резонатор, состоящий из конденсаторной 8 и тороидальной части. Конденсаторная часть выполнена из соосно расположенных наружного конуса 7 и внутреннего электроприводного конуса 9. Образованный между наружным цилиндром 11 и внутренним цилиндром 19 кольцевой канал 12 и коническая ёмкость 18 представляет тороидальную часть квазиторoidalного резонатора. Цилиндры 11 и 19 расположены соосно. Над вершиной наружного конуса 7 установлена загрузочная ёмкость 1. Она предназначена для подачи через специальный патрубок 4 воздушным потоком не шелушённых семян рапса и распыления воды. В загрузочной ёмкости 1 имеется направляющий лоток 2.

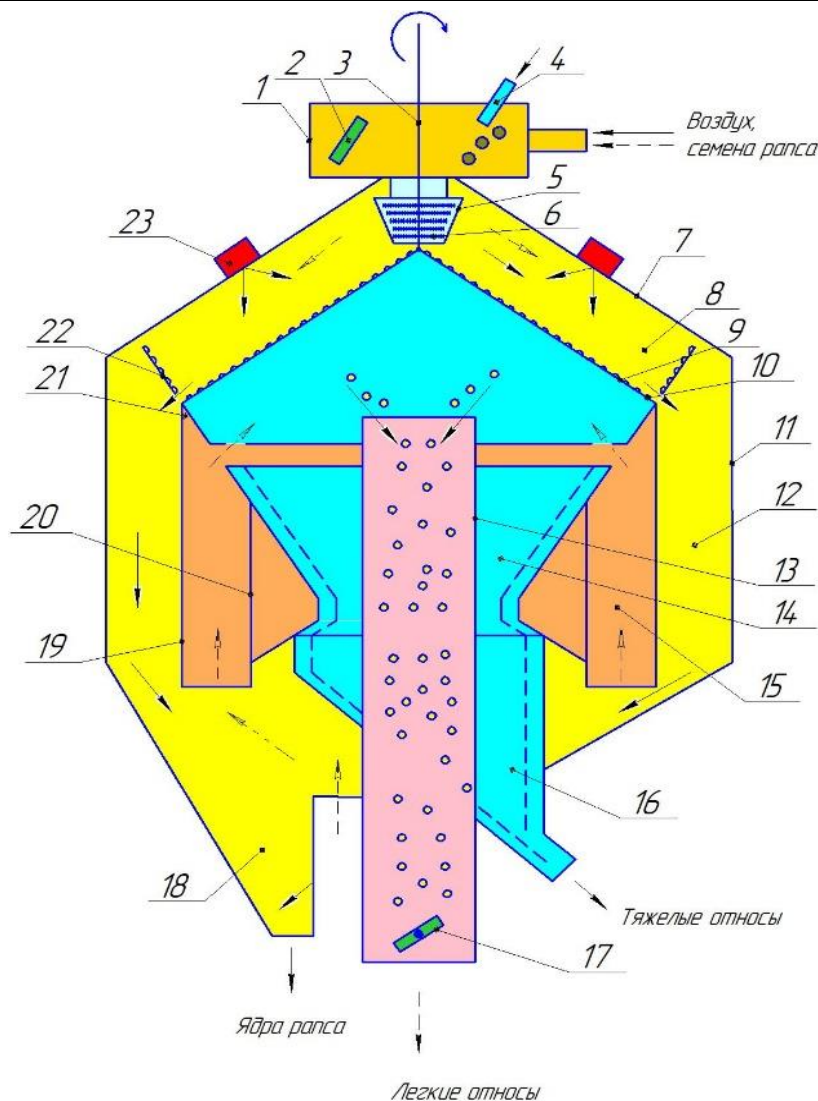


Рис. 1. Установка для шелушения рапса в электромагнитном поле сверхвысокой частоты: 1 — неферромагнитная загрузочная емкость; 2 — направляющий лоток; 3 — электропривод с радиопрозрачным валом; 4 — патрубок для подачи воды; 5 — радиопрозрачная воронка; 6 — радиопрозрачная электроприводная щетка; 7 — неферромагнитный наружный конус; 8 — конденсаторная часть квазиторидального резонатора; 9 — неферромагнитный внутренний электроприводной конус; 10 — мелкозернистый абразивный материал; 11 — неферромагнитный наружный цилиндр; 12 — тороидальная часть; 13 — радиопрозрачный центральный цилиндр; 14 — радиопрозрачная осадочная камера; 15 — пневмосепарирующий канал; 16 — радиопрозрачный патрубок; 17 — клапан; 18 — неферромагнитная коническая емкость; 19 — внутренний неферромагнитный цилиндр; 20 — радиопрозрачный средний цилиндр; 21 — радиопрозрачный поддон; 22 — радиопрозрачное отражательное кольцо; 23 — магнетроны воздушного охлаждения.

Fig. 1. The facility for rapeseed peeling in the ultrahigh frequency electromagnetic field: 1 — a non-ferromagnetic loading container; 2 — a guiding tray; 3 — an electric drive with a radio-transparent shaft; 4 — a water supply pipe; 5 — a radio-transparent funnel; 6 — a radio-transparent electric brush; 7 — a non-ferromagnetic outer cone; 8 — a condenser part of the quasi-toroidal resonator; 9 — a non-ferromagnetic inner electric cone; 10 — a fine-grained abrasive material; 11 — a non-ferromagnetic outer cylinder; 12 — a toroidal part; 13 — a radio-transparent central cylinder; 14 — a radio-transparent sedimentary chamber; 15 — a pneumatic separation channel; 16 — a radio-transparent nozzle; 17 — a valve; 18 — a non-ferromagnetic conical container; 19 — an internal non-ferromagnetic cylinder; 20 — a radio-transparent middle cylinder; 21 — a radio-transparent tray; 22 — a radio-transparent reflective ring; 23 — air-cooled magnetrons.

Поверхность электроприводного конуса 9, выполненного без основания, покрыта мелкозернистым абразивным материалом 10. Под вершиной наружного конуса 7 в конденсаторной части 8 резонатора, установлена радиопрозрачная воронка 5, внутри которой расположена электроприводная радиопрозрачная щетка 6. На радиопрозрачный вал 3 установлена электроприводная радиопрозрачная щетка 6, а под ней внутренний электроприводной конус 9. Под ним расположен радиопрозрачный центральный цилиндр 13, установленный соосно в радиопрозрачной осадочной камере 14, выполненной в виде усеченного конуса без оснований, пристыкованной к радиопрозрачному патрубку 16. Над осадочной

камерой 14 через зазор установлен радиопрозрачный поддон 21, на основании которого имеется кольцевое отверстие. Пневмосепарирующий канал 15 образован между внутренним цилиндром 19 и радиопрозрачным средним цилиндром 20, размещённым соосно под радиопрозрачной конической камерой 14. Магнетроны 23 воздушного охлаждения расположены со сдвигом на 120 градусов по периметру боковой поверхности наружного конуса 7 так, что излучатели направлены через волновод в конденсаторную часть 8 резонатора.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.

Включить электродвигатель для вращения электроприводной щетки 6 и внутреннего электроприводного конуса 9 и подачу распылённой воды через патрубок 4 в загрузочную емкость 1. Открыть узел для подачи потоком воздуха исходных семян рапса с примесями в загрузочную емкость 1. Далее, семена с увлажнённой оболочкой, ударяясь о направляющий лоток 2, падают в радиопрозрачную воронку 5. После этого следует включить вентиляторы, магнетроны 23. Тогда в квазитороидальном резонаторе возбуждается ЭМП СВЧ (2450 МГц, длина волны 12,24 см). В конденсаторной части обеспечивается высокая напряжённость электрического поля, более 2 кВ/см.

Известно [4, 7–26], что при генерации электромагнитного поля моды H_{011} в цилиндрической части квазитороидального резонатора не требуется наличие контакта между внутренним цилиндром 19 и основанием. В конструкции основанием служит внутренний электроприводный конус 9, расположенный с зазором не более четверти длины волны (3,06 см) от внутреннего цилиндра 19. В стенках квазитороидального резонатора возбуждаются токи, текущие по окружности внутреннего цилиндра 19, а в резонаторе электромагнитное поле бегущей волны. В радиопрозрачной воронке 5, соосно расположенная радиопрозрачная электроприводная щетка 6 обеспечивает равномерное распределение влаги по поверхности семян рапса. Так как радиопрозрачная воронка 5 расположена в конденсаторной части 8 резонатора, при воздействии ЭМП СВЧ избирательно происходит диэлектрический нагрев, в зависимости от фактора диэлектрических потерь оболочки и ядра. Градиент влаги от поверхности семян рапса к ядру и градиент влаги с центра ядра при расположении в ЭМП СВЧ будут противоположными, что позволит отделить оболочку от ядра. В радиопрозрачной воронке 5 происходит отделение семян рапса от воздуха. Далее, семена рапса попадают на поверхность внутреннего электроприводного конуса 9. Постепенное истирание оболочек происходит в результате трения семян рапса о поверхность с мелкозернистым абразивным материалом электроприводного конуса 9. Многократный удар семян рапса происходит о радиопрозрачное отражательное кольцо 22, покрытое также мелкозернистым абразивным материалом. Семена рапса, под действием центробежных сил при вращении электроприводного конуса 9, отбрасываются к поверхности радиопрозрачного отражательного кольца 22. Скорость удара семян рапса о радиопрозрачное отражательное кольцо 22, при которой происходит шелушение рапса, зависит от его влажности, от удельной мощности сверхвысокочастотного генератора, напряженности электрического поля.

Ядра сохраняют свою целостность, так как они прошли отволаживание в ЭМП СВЧ и частота вращения электроприводного конуса 9 оптимизирована.

При скатывании семян по поверхности электроприводного конуса 9 их оболочки истираются и попадают в тороидальную часть 12 резонатора. Оттуда через направляющее кольцевое отверстие они попадают в восходящий поток воздуха пневмосепарирующего канала 15. Очищенные от оболочек ядра падают вниз и выводятся через коническую ёмкость 18, предназначенную для накопления ядер рапса. Лёгкие частицы воздухом поднимаются вверх через пневмосепарирующий канал 15. Через зазор между радиопрозрачным поддоном 21 и радиопрозрачной осадочной камерой 14 тяжёлые отходы попадают в неё (14).

Во внутренней полости радиопрозрачной осадочной камеры 14 происходит отделение тяжёлых отходов от лёгких примесей. Под действием гравитационных сил тяжёлые отходы выпадают из воздушного потока и выводятся через радиопрозрачный патрубок 16. Лёгкие примеси под действием аэродинамических сил поступают в радиопрозрачный центральный цилиндр 13, откуда вместе с воздухом выводятся из него при определённом напоре потока воздуха, регулируемого клапаном 17.

Таким образом, в установке происходит разделение смеси семян рапса и воздуха на три фракции: ядро, тяжёлые отходы и воздух с лёгкими отходами. Отделение ядер рапса от лузги (оболочки) происходит за счёт различия их аэродинамических свойств. Основным показателем аэродинамических свойств частиц смеси, определяющим её делимость в воздушном потоке, служит скорость витания. В пневмосепарирующем канале 15 при турбулентном движении воздушного потока сила сопротивления зависит от динамического воздействия потока на ядра семян рапса, а именно, от коэффициента аэродинамического сопротивления, Миделева сечения, плотности воздуха, относительной скорости частицы.

На характер взаимодействия семян рапса с водой влияют следующие основные факторы: сорбционные

свойства рапса, параметры влагоносителя и окружающей среды. Скорость поглощения влаги зависит от особенностей семян рапса. Семена рапса достаточно увлажнять водой только перед термообработкой. Содержание влаги в оболочке и ядре семян рапса неодинаково. В ядре рапса влага в ЭМП СВЧ распространяется медленнее, чем в оболочке. При этом в оболочке семян рапса появляются микротрещины, что облегчает отделение от ядра. Количество и скорость поглощения влаги зависит от температуры нагрева компонентов семян рапса. При повышении температуры возрастает кинетическая энергия молекул воды и, следовательно, интенсивность влагопереноса в оболочке. С увеличением температуры воды скорость её поглощения оболочкой рапса увеличивается.

Согласование напряжённости электрического поля с собственной добротностью резонатора, мощностью генератора проведены по методике О.О. Дробахина [5]. При известных размерах квазиторoidalного резонатора, его собственную добротность (Q) можно определить по формуле:

$$Q = \frac{2 \cdot V}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot S} = \frac{2 \cdot 0,0185}{1,716 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2545} = 45796, \quad (1)$$

где V , S — объём и площадь поверхности резонатора, соответственно, м^3 , м^2 ; $\Delta = 1,716 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ — толщина поверхностного слоя алюминиевого корпуса резонатора.

$$V_{\text{тор}} = 2 \cdot \pi \cdot [30,6 \cdot 61,2 - 24,48 \cdot 51] = 3920 \text{ см}^3$$

$$V_{\text{конд}} = (\pi \cdot R^2 \cdot h / 3) - (\pi \cdot r^2 \cdot h / 3) = (\pi \cdot 30,6^2 \cdot 15,24 / 3) - (\pi \cdot 24,48^2 \cdot 15,24 / 3) = 5377 \text{ см}^3$$

$$V_{\text{общ}} = 2 \cdot (3920 + 5377) = 18594 \text{ см}^3$$

$$S_{\text{конд}} = \pi \cdot R \cdot L + \pi \cdot r \cdot l = 3,14 \cdot 30,6 \cdot 34,19 + 3,14 \cdot 24,48 \cdot 28,84 = 2545 \text{ см}^2.$$

Напряжённость электрического поля в квазиторoidalном резонаторе (E , В/м) по формуле:

$$E = \frac{Q \cdot P}{0,27 \cdot 10^5 \cdot \epsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V} = \frac{45796 \cdot 2400}{0,27 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,018 \cdot 10^5} = 15 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}, \quad (2)$$

где P — мощность генератора, Вт; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума ($8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$); f — частота ЭМП, Гц; V — объём резонатора, м^3 .

Предварительные расчёты показывают, что напряжённость электрического поля в конденсаторной части доходит до 15 кВ/см, что позволяет при окружной скорости ротора 18–20 м/с увеличить температуру диэлектрического нагрева семян рапса на 15–20 °С. Такая температура способствует отделению увлажнённой оболочки от ядра. При мощности электропривода конического ротора 4,2 кВт, частоте вращения 750 об/мин, мощности магнетронов 3,3 кВт, производительность установки для шелушения семян рапса составит 150 кг/ч. Энергетические затраты будут равны 0,05 кВт·ч/кг. Результаты исследования электродинамических параметров по программе CST Microwave Studio [27–29] показывают, что напряжённость электрического поля в конденсаторной части может составить 15 кВ/см.

ВЫВОДЫ

Достоинствами шелушителя с СВЧ энергоподводом в квазистационарном резонаторе являются высокая технологическая эффективность и сравнительно малый расход электроэнергии. Радиопрозрачное отражательное кольцо, покрытое мелкозернистым абразивным материалом, увеличивает зону удара семян рапса. Эндогенное тепло усиливает процесс набухания оболочек. Возникающие внутренние сдвиги облегчают процесс отделения оболочек от ядра рапса, а тепловой фактор позволяет сокращать продолжительность отделения оболочек от ядра.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Н.Н. Кучин — анализ технологии шелушения семян рапса и зерновых культур и существующих машин; Н.В. Цугленок — обоснование эффективных режимов работы установки с источником электромагнитных излучений; доработка текста; составление выводов; В.Ф. Сторчевой — работа над реализацией инновационной идеи шелушения семян рапса в квазиторoidalном резонаторе

СВЧ установки; утверждение окончательной версии рукописи; описание принципа действия установки для шелушения семян рапса.

Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE*. Все авторы внесли существенный вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. N.N. Kuchin — analysis of the technology of peeling of rapeseed and grain crops and existing machines; N.V. Tsuglenok — justification of effective modes of operation of the facility with a source of electromagnetic radiation; text revision; drawing conclusions; V.F. Storchevoy — work on the implementation of the innovative idea of rapeseed seeds peeling in the quasi-toroidal resonator of the microwave facility; approval of the final version of the manuscript; A.V. Storchevoy — description of the idea of operation of the facility for rapeseed peeling. All the authors made a significant contribution to the research and preparation of the article, read and approved the final version before publication.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding source. The authors state that there is no external funding for the study.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2710063 / 24.12.19. Бюл. № 36. Шамин Е.А., Михайлова О.В., Белова М.В., и др. Установка для шелушения рапса в электромагнитном поле сверхвысокой частоты. EDN: AWTAOV
2. Патент РФ № 2769134 / 28.03.2022. Бюл. № 10. Новикова Г.В., Просвирякова М.В., Михайлова О.В. Установка для отделения оболочки семян рапса в процессе воздействия ЭМП СВЧ. EDN: ELQDAR
3. Бутковский В.А., Мельников Е.М. Технология мукомольного, крупяного и комбикормового производств. М.: Агропромиздат, 1989.
4. Стрекалов А.В., Стрекалов Ю.В. Электромагнитные поля и волны. М.: РИОР: ИНФРА-М. 2014.
5. Дробахин О.О., Плаксин С.В., Рябчий В.Д., Салтыков Д.Ю. Техника и полупроводниковая электроника СВЧ. Севастополь: Вебер, 2013.
6. Дробахин О.О., Салтыков Д.Ю. Исследование возможности применения связанных биконических резонаторов для определения параметров диэлектрических материалов // Прикладная радиоэлектроника. 2014. Т. 1, № 1. С. 63–69.
7. Патент РФ на изобретение 2798570 / 23.06.2023. Бюл. № 18. Новикова Г.В., Михайлова О.В., Просвирякова М.В. и др. СВЧ установка для шелушения семян рапса. EDN: WFWVWU
8. Патент РФ на изобретение 2769134 / 28.03.2022. Бюл. № 10. Новикова Г.В., Просвирякова М.В., Булатов В.А. и др. Установка для отделения оболочки семян рапса в процессе воздействия ЭМП СВЧ. EDN: ELQDAR
9. Трухачев В.И., Сторчевой В.Ф., Кабдин Н.Е. и др. Развитие электроснабжения и применения электроэнергии в АПК. Москва: Мегapolis, 2022. EDN: QXUUOP
10. Новикова Г., Михайлова О., Просвирякова М., Шаронова Т. Установка для шелушения рапса в электромагнитном поле сверхвысокой частоты // Комбикорма. 2022. № 12. С. 29–31. EDN: MSHNBZ doi: 10.25741/2413-287X-2022-12-2-189
11. Новикова Г.В., Михайлова О.В., Просвирякова М.В. и др. Разработка установки для шелушения рапса // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 1 (16). С. 94–99. EDN: JKXXHC
12. Новикова Г.В., Коробков А.Н., Михайлова О.В., Анисимова М.А. Установка для шелушения рапса в электромагнитном поле сверхвысокой частоты // Инновации в сельском хозяйстве.

2020. № 2 (35). С. 77–85. EDN: ZLSSAT
13. Осокин В.Л., Михайлова О.В., Казаков А.В., Тихонов А.А. Электромагнитная безопасность при обслуживании СВЧ установок // Инновации в сельском хозяйстве. 2020. № 2 (35). С. 94–101. EDN: EQHXLF
 14. Шамин Е.А., Новикова Г.В., Михайлова О.В., Просвирякова М.В. Исследование распределения электромагнитного поля в резонаторе СВЧ установки непрерывно-поточного действия // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 4 (15). С. 115–123. EDN: XFAZRQ doi: 10.17022/chb3-fp18
 15. Новикова Г.В., Жданкин Г.В., Михайлова О.В., Белова М.В. Установка для комплексного воздействия электрофизических факторов на сырье // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия химии и технологии. 2019. № 4 (436). С. 54.
 16. Михайлова О.В., Белова М.В., Коробков А.Н., Новикова Г.В. Разработка установки для шелушения рапса в электромагнитном поле сверхвысокой частоты // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2019. Т. 81. № 2 (80). С. 27–34. EDN: XDAEZW doi: 10.20914/2310-1202-2019-2-27-34
 17. Крайнов Ю.Е., Михайлова О.В., Казаков А.В., Меженина Е.И. Разработка и обоснование параметров установок для высокотемпературного формования комбинированного сырья // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 2 (35). С. 84–89. EDN: XBMGOV
 18. Патент РФ на изобретение 2641705 / 22.01.2018. Бюл. № 3. Осокин В.Л., Коробков А.Н., Белов А.А., и др. Сверхвысокочастотная установка для обеззараживания сыпучего сырья в непрерывном режиме. EDN: LFAQEUF
 19. Патент РФ на изобретение 2671699 / 06.11.2018. Бюл. № 5. Белов А.А., Жданкин Г.В., Новикова Г.В., Михайлова О.В. Сверхвысокочастотная установка с передвигными полусферами для термомеханического разрушения сырья. EDN: KICAFI
 20. Патент РФ на изобретение 2655756 / 29.05.2018. Бюл. № 15. Коробков А.Н., Белов А.А., Михайлова О.В. и др. Сверхвысокочастотная установка для термообработки сыпучих продуктов. EDN: ZSVWSS
 21. Коробков А.Н., Михайлова О.В., Злобина Н.О. Разработка сверхвысокочастотной установки для термообработки сыпучего сырья. В кн.: Техника, дороги и технологии: перспективы развития. Сборник материалов Десятой студенческой научно-практической конференции имени Николая Васильевича Попова. Чебоксары: Волжский филиал МАДИ, 2018. С. 100–103. EDN: YWRTCT
 22. Крайнов Ю.Е., Михайлова О.В., Кириллов Н.К. Анализ рабочих камер, обеспечивающих термообработку и гранулирование отходов сельскохозяйственного сырья // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 2 (42). С. 6–12. EDN: XREQAX doi: 10.18286/1816-4501-2018-2-6-12
 23. Патент РФ на изобретение 2629221 / 28.08.2017. Бюл. № 25. Белов А.А., Жданкин Г.В., Новикова Г.В., Михайлова О.В. Сверхвысокочастотная установка с резонатором, образованным между двумя сферами для термомеханического разрушения сырья. EDN: VVXFQC
 24. Коробков А.Н., Михайлова О.В. Совершенствование технологии и сверхвысокочастотных установок для обеззараживания комбикорма // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. 2018. № 20. С. 380–384. EDN: YLBHLN
 25. Коробков А.Н., Осокин В.Л., Михайлова О.В., Белов А.А. Разработка установки для обеззараживания сыпучего сырья в непрерывном режиме // Вестник ВИЭСХ. 2017. № 1 (26). С. 27–31. EDN: YYYJF
 26. Белов А.А., Михайлова О.В. Безопасная эксплуатация сверхвысокочастотной техники // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 4 (19). С. 335–338. EDN: WHAOVP
 27. Рябченко В.Ю., Паслен В.В. Компьютерное моделирование объектов с помощью ПП CST microwave Studio // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2018. № 1. С. 139. EDN: QIKITH
 28. Захаров В.В., Янкин С.В., Тригорлый С.В. Численное моделирование процессов СВЧ термообработки диэлектриков большой площади с применением СВЧ установок непрерывного действия // Вопросы электротехнологии, 2018. № 3(20). С. 36–41.

29. Алексейчик Л.В., Курушин А.А. Моделирование возбуждения диэлектрического резонатора полем плоской электромагнитной волны // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 11. С. 6. EDN: XYFOXV doi: 10.30898/1684-1719.2020.11.1

REFERENCES

1. Patent RUS № 2710063 / 24.12.19. Byul. № 36. Shamin EA, Mikhaylova OV, Belova MV, et al. Ustanovka dlya shelusheniya rapsa v elektromagnitnom pole sverkhvysokoy chastoty. (In Russ). EDN: AWTAOV
2. Patent RUS № 2769134 / 28.03.2022. Byul. № 10. Novikova GV, Prosviryakova MV, Mikhaylova OV. Ustanovka dlya otdeleniya obolochki semyan rapsa v protsesse vozdeystviya EMPSVCh. (In Russ). EDN: ELQDAR
3. Butkovsky VA, Melnikov EM. *Technology of milling, cereal and feed production*. M.: Agropromizdat; 1989. (In Russ).
4. Strekalov AV. *Electromagnetic fields and waves*. M.: RIOR: INFRA-M; 2014. (In Russ).
5. Drobakhin OO, Plaksin SV, Ryabchiy VD, Saltykov DY. *Microwave technology and semiconductor electronics*. Sevastopol: Weber; 2013. (In Russ).
6. Drobakhin OO. Investigation of the possibility of using coupled biconic resonators to determine the parameters of dielectric materials. *Applied radioelectronics*. 2014;1(1): 63-69. (In Russ).
7. Patent RUS na izobretenie 2798570 / 23.06.2023. Byul. № 18. Novikova GV, Mikhaylova OV, Prosviryakova MV, et al. SVCh ustanovka dlya shelusheniya semyan rapsa. (In Russ). EDN: WFWVWU
8. Patent RUS na izobretenie 2769134 / 28.03.2022. Byul. № 10. Novikova GV, Prosviryakova MV, Bulatov VA, et al. Ustanovka dlya otdeleniya obolochki semyan rapsa v protsesse vozdeystviya EMPSVCh. (In Russ). EDN: ELQDAR
9. Trukhachev VI, Storchevoy VF, Kabdin NE, et al. *The development of electricity supply and the use of electricity in agriculture*. Moscow: Megapolis; 2022. (In Russ). EDN: QXUUOP
10. Novikova G, Mikhailova O, Prosviryakova M, Sharonova T. Installation for peeling brine in an electromagnetic field of ultrahigh frequency. *Compound feed*. 2022;12:29–31. (In Russ). EDN: MSHNBZ DOI: 10.25741/2413-287X-2022-12-2-189
11. Novikova GV, Mikhailova OV, Prosviryakova MV, et al. Development of a rapeseed peeling plant. *Bulletin of the Chuvash State Agricultural Academy*. 2021;1(16):94–99. (In Russ). EDN: JKXXHC
12. Novikova GV, Korobkov AN, Mikhailova OV, Anisimova MA. Installation for peeling rapeseed in an electromagnetic field of ultrahigh frequency. *Innovations in agriculture*. 2020;2 (35):77–85. (In Russ). EDN: ZLSSAT
13. Osokin VL, Mikhailova OV, Kazakov AV, Tikhonov AA. Electromagnetic safety in the maintenance of microwave installations. *Innovations in agriculture*. 2020;2(35):94–101. (In Russ). EDN: EQHXLF
14. Shamin EA, Novikova GV, Mikhailova OV, Prosviryakova MV. Investigation of the distribution of the electromagnetic field in the resonator of a continuous-flow microwave installation. *Bulletin of the Chuvash State Agricultural Academy*. 2020;4(15):115–123. (In Russ). EDN: XFAZRQ doi: 10.17022/chb3-fp18
15. Novikova GV, Zhdankin GV, Mikhailova OV, Belova MV. Installation for the complex effect of electrophysical factors on raw materials. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Chemistry and Technology series*. 2019;4(436):54. (In Russ).
16. Mikhailova OV, Belova MV, Korobkov AN, Novikova GV. Development of an installation for drying rapeseed in an ultrahigh frequency electromagnetic field. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2019;81(2(80)):27–34. (In Russ). EDN: XDAEZW doi: 10.20914/2310-1202-2019-2-27-34
17. Krainov YuE, Mikhailova OV, Kazakov AV, Mezhenina EI. Development and justification of parameters of installations for high-temperature molding of combined raw materials. *Electrical technologies and electrical equipment in agriculture*. 2019;2(35):84–89. (In Russ). EDN: XBMGOV
18. Patent RUS na izobretenie 2641705 / 22.01.2018. Byul. № 3. Osokin VL, Korobkov AN, Belov AA, et al. Sverkhvysokochastotnaya ustanovka dlya obezzarzhivaniya sypuchego syrya v nepreryvnom rezhime. (In Russ). EDN: LfqEUF

19. Patent RUS na izobrenenie 2671699 / 06.11.2018. Byul. № 5. Belov AA, Zhdankin GV, Novikova GV, Mikhaylova OV. Sverkhvysokochastotnaya ustanovka s peredvizhnymi polu-sferami dlya termomekhanicheskogo razrusheniya syrya. (In Russ). EDN: KICAIF
20. Patent RUS na izobrenenie 2655756 / 29.05.2018. Byul. № 15. Korobkov AN, Belov AA, Mikhaylova OV, et al. Sverkhvysokochastotnaya ustanovka dlya termoobrabotki sypuchikh produktov. (In Russ). EDN: ZSVWSS
21. Korobkov AN, Mikhailova OV, Zlobina NO. Development of an ultrahigh frequency installation for heat treatment of bulk materials. In: *Machinery, roads and technologies: prospects of development. Collection of materials of the Tenth Student Scientific and practical Conference named after Nikolai Vasilyevich Popov*. Cheboksary: Volzhskiy filial MADI; 2018:100–103. (In Russ). EDN: YWRTCT
22. Krainov YuE, Mikhailova OV, Kirillov NK. Analysis of working chambers providing heat treatment and granulation of agricultural raw materials waste. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2018;2(42):6–12. (In Russ). EDN: XREQAX doi: 10.18286/1816-4501-2018-2-6-12
23. Patent RF na izobrenenie 2629221 / 28.08.2017. Byul. № 25. Belov AA, Zhdankin GV, Novikova GV, Mikhaylova OV. Sverkhvysokochastotnaya ustanovka s rezonatorom, obra-zovannym mezhdvumya sferami dlya termomekhanicheskogo razrusheniya syrya. (In Russ). EDN: VVXFQC
24. Korobkov AN, Mikhailova OV. Improvement of technology and ultrahigh frequency installations for disinfection of compound feed. *Topical issues of improving the technology of production and processing of agricultural products*. 2018;20:380–384. (In Russ). EDN: YLBHLN
25. Korobkov AN, Osokin VL, Mikhailova OV, Belov AA. Development of an installation for decontamination of bulk raw materials in a continuous mode. *Vestnik RESKH*. 2017;1(26):27-31. (In Russ). EDN: YYYSJF
26. Belov AA, Mikhailova OV. Safe operation of ultrahigh frequency equipment. *Innovations in agriculture*. 2016;4(19):335–338. (In Russ). EDN: WHAOVP
27. Ryabchenko VYu, Nightshade VV. Computer modeling of objects using PP ST microwave Studio. *Modern problems of radio electronics and telecommunications*. 2018;1:139. (In Russ). EDN: QIKITH
28. Zakharov VV, Yankin SV, Trigorly SV. Numerical modeling of microwave thermal treatment of large-area dielectrics using continuous microwave installations. *Issues of electrical technology*. 2018;3(20): 36–41. (In Russ).
29. Alekseychik LV, Kurushin AA. Modeling of excitation of a dielectric resonator by a plane electromagnetic wave field. *Journal of Radioelectronics*. 2020;11:6. (In Russ). doi: 10.30898/1684-1719.2020.11.1

ОБ АВТОРАХ / AUTHORS' INFO

* Кучин Николай Николаевич

профессор, д-р тех. наук,
 профессор кафедры «Технический сервис»;
 адрес: Российская Федерация, Нижегородская область, 606340, Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а;
 ORCID: 0009-0001-9176-2988;
 eLibrary SPIN: 7394-2263;
 e-mail: nkuchin53@mail.ru

Соавторы:

Цугленок Николай Васильевич,

член-корр. РАН, д-р тех. наук,
 первый вице-президент;
 ORCID: 0000-0001-7985-4217;
 eLibrary SPIN: 3675-2354;
 e-mail: ntsuglenok@mail.ru

Сторчевой Владимир Федорович,

профессор, д-р техн. наук,
 заведующий кафедрой «Автоматизация и роботизация технологических процессов имени

* Nikolay N. Kuchin,

Professor, Dr. Sci. (Engineering),
 Professor of the Technical Service Department;
 address: 22a Oktyabrskaya street, 606340
 Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russian Federation;
 ORCID: 0009-0001-9176-2988;
 eLibrary SPIN: 7394-2263;
 e-mail: nkuchin53@mail.ru

Co-Authors:

Nikolay V. Tsuglenok,

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr Sci. (Engineering),
 First Vice-President;
 ORCID: 0000-0001-7985-4217;
 eLibrary SPIN: 3675-2354;
 e-mail: ntsuglenok@mail.ru

Vladimir F. Storchevov,

Professor, Dr Sci. (Engineering),

академика И.Ф. Бородин»;
ORCID: 0000-0002-6929-3919;
eLibrary SPIN:3546-7363;
e-mail: v_storchevoy@mail.ru

Сторчевой Александр Владимирович,
старший преподаватель кафедры социально-гуманитарных дисциплин;
ORCID: 0000-0003- 3404-0361;
eLibrary SPIN: 7771-2542;
e-mail: alecks.10@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку/ Corresponding author

Head of the Automation and Robotization of Technological Processes Department named after Academician I.F. Borodin;
ORCID: 0000-0002-6929-3919;
eLibrary SPIN: 3546-7363;
e-mail: v_storchevoy@mail.ru
Alexander V. Storchevoy,
Senior Lecturer of the Social and Humanitarian Studies Department;
ORCID: 0000-0003- 3404-0361;
eLibrary SPIN: 7771-2542;
e-mail: alecks.10@mail.ru