

НАПРАВЛЕНИЯ В ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ И СОКРАЩЕНИИ «УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА» В ПРОИЗВОДСТВАХ МИНЕРАЛЬНЫХ ФОСФОРСОДЕРЖАЩИХ УДОБРЕНИЙ

Д.С. Медников, Ю.А. Марик, Д.А. Пагалешкин, П.С. Федотов, А.М. Норов

Дмитрий Сергеевич Медников (ORCID 0009-0001-4707-1282)*, Юрий Александрович Марик (ORCID 0009-0004-5437-6705), Денис Александрович Пагалешкин (ORCID 0009-0003-8652-5229), Павел Сергеевич Федотов (ORCID 0009-0000-6835-6968), Андрей Михайлович Норов (ORCID 0009-0005-8344-3062)

АО «Научно-исследовательский институт по удобрениям и инсектофунгицидам им. проф. Я.В. Самойлова», Северное шоссе, 75, Череповец, Вологодская обл., Российская Федерация, 162625

E-mail: DMednikov@phosagro.ru

В данной статье рассматриваются технические мероприятия, направленные на повышение энергоэффективности производства гранулированных удобрений и основанные на двух ключевых подходах к организации технологического процесса. Первый ключевой подход подразумевает более полное использование тепла экзотермических реакций, второй ключевой подход подразумевает применение комплекса мероприятий, направленных на использование (рекуперацию) тепла от внутренних и внешних тепловых потоков установки. Мероприятия каждого ключевого подхода позволяют решить вопросы энергосбережения, снижения потребления природного газа и сокращения «углеродного следа» в производствах минеральных фосфорсодержащих удобрений. Приведены примеры технических мероприятий, которые выполнялись или планируются к реализации на химических предприятиях при непосредственном участии специалистов АО «НИУИФ» на стадии предпроектной проработки, разработки проектной документации, пуска и освоения проектных показателей производства. Наиболее динамичное развитие производственных мощностей производства минеральных фосфорсодержащих удобрений на химических предприятиях произошло с начала десятих годов текущего столетия за счет реконструкции действующих систем и строительства новых установок. При разработке организации производства, разработке технологий и проектировании техперевооружения и нового строительства применялись принципы наилучших доступных технологий (НДТ), включая реализацию мероприятий по энергосбережению. Применение энерго- и ресурсосберегающих подходов в производстве минеральных фосфорсодержащих удобрений, внедрение в производство современного оборудования и агрегатов позволяет снижать удельный расход природного газа на единицу продукции, снижать потребление энергоресурсов, а также сократить негативное влияние на окружающую среду, в том числе вести «углеродный след» в производстве удобрений к нулевому уровню.

Ключевые слова: энергосбережение, «углеродный след», производство минеральных удобрений

DIRECTIONS IN ENERGY SAVING AND REDUCTION OF THE "CARBON FOOTPRINT" IN THE PRODUCTION OF MINERAL PHOSPHORUS-CONTAINING FERTILIZERS

D.S. Mednikov, Yu.A. Marik, D.A. Pagaleshkin, P.S. Fedotov, A.M. Norov

Dmitry S. Mednikov (ORCID 0009-0001-4707-1282)*, Yury A. Marik (ORCID 0009-0004-5437-6705), Denis A. Pagaleshkin (ORCID 0009-0003-8652-5229), Pavel S. Fedotov (ORCID 0009-0000-6835-6968), Andrey M. Norov (ORCID 0009-0005-8344-3062)

Joint Stock Company «The Research Institute for Fertilizers and Insecto-Fungicides Named after Professor Y. Samoilov», Severnoye shosse, 75, Cherepovets, Vologda region, 162625, Russia

E-mail: DMednikov@phosagro.ru

This article discusses technical measures aimed at improving the energy efficiency of the production of granular fertilizers, and relate to one of the two key approaches to the organization of the technological process. The first key approach implies a more complete use of the heat of exothermic reactions. The second key approach implies the use of a set of measures aimed at using (recovering) heat from internal and external heat flows of the installation. The activities of each key approach make it possible to solve the issues of energy saving, reducing natural gas consumption and reducing the "carbon footprint" in the production of mineral phosphorus-containing fertilizers. Examples of technical measures that were carried out or are planned to be implemented at the chemical enterprises with the direct participation of specialists of JSC NIUF at the stage of pre-design study, development of project documentation, start-up and development of design production indicators are given. The most dynamic development of production capacities for the production of mineral phosphorus-containing fertilizers at the chemical enterprises has occurred since the beginning of the tenth years of this century due to the reconstruction of existing systems and the construction of new installations. When developing the organization of production, developing technologies and designing technical re-equipment and new construction, the principles of the best available technologies (BAT) were applied, including the implementation of energy saving measures. The use of energy- and resource-saving approaches in the production of mineral phosphorus-containing fertilizers, the introduction of modern equipment and aggregates into production makes it possible to reduce the specific consumption of natural gas per unit of production, reduce energy consumption, as well as reduce the negative impact on the environment, including reducing the "carbon footprint" in fertilizer production to zero.

Keywords: energy saving, "carbon footprint", production of mineral fertilizers

Для цитирования:

Медников Д.С., Марик Ю.А., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Норов А.М. Направления в энергосбережении и сокращении «углеродного следа» в производствах минеральных фосфорсодержащих удобрений. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 5. С. 28–38. DOI: 10.6060/ivkkt.20256805.5f.

For citation:

Mednikov D.S., Marik Yu.A., Pagareshkin D.A., Fedotov P.S., Norov A.M. Directions in energy saving and reduction of the "carbon footprint" in the production of mineral phosphorus-containing fertilizers. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 5. P. 28–38. DOI: 10.6060/ivkkt.20256805.5f.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы на предприятиях по производству минеральных удобрений вопросам охраны окружающей среды и энерго- и ресурсосбережения уделяется особое внимание. На производстве в качестве топлива для сушки минеральных удобрений используется природный газ, но при этом он одновременно является антропогенным источником выбросов углекислого газа (диоксида углерода (IV)). Все возрастающее внимание вызывают вопросы, связанные с выбросом парниковых газов¹, в т.ч. углекислого газа. Углекислый газ (CO₂) относится к основным парниковым газам,

которые образуются при сжигании ископаемых видов топлива. Углекислый газ – основной источник климатических изменений, на долю которого приходится по оценкам около 64% глобального потепления [1]. Газ CO₂ дольше всего сохраняется в атмосфере и поэтому заслуживает особого внимания². В целях борьбы с изменением климата и его негативными последствиями в 2015 г. 197 стран приняли Парижское соглашение. Это соглашение направлено на существенное сокращение глобальных выбросов парниковых газов и ограничение повышения глобальной температуры в 21-ом столетии до 2 °С. В 2016 г. Российская Федерация подписала Парижское соглашение, в соответствии с

¹ Парниковые газы (greenhouse gases, GHG) - газы с высокой прозрачностью в видимом диапазоне и с высоким поглощением в тепловом инфракрасном диапазоне. Без естественных, улавливающих тепло газов - главным образом водяного пара, углекислого газа, метана, озона (O₃) - Земля была бы

слишком холодной (-18 °С), чтобы поддерживать жизнь. Опасность заключается в быстром увеличении количества углекислого газа (CO₂) и других парниковых газов, которые усиливают этот естественный парниковый эффект.

² Россия вошла в тройку стран по выбросам углекислого газа. Лидируют США и Китай.

которым взяла на себя обязательства по снижению выбросов в атмосферу парниковых газов³.

В связи с этим эколого-экономический фактор становится все более весомым в принятии решений по промышленной политике отдельных предприятий и в химической отрасли в целом. Например, большое внимание уделяется эволюции технологии аммиака, как наиболее распространенного соединения связанного азота, с позиции совершенствования подходов энерго- и ресурсосбережения. Существующие высокие темпы потребления ископаемого углеродного топлива, особенно природного газа, который является в настоящее время основным видом сырья для производства аммиака, и связанные с этим ежегодно растущие выбросы диоксида углерода в атмосферу, вынуждают ученых всего мира искать альтернативные способы промышленного получения аммиака [2, 3].

Для стимулирования инвестиционной деятельности производителей минеральных удобрений на национальном уровне разрабатываются и выпускаются информационно-технические справочники по наилучшим доступным технологиям (НДТ) в отрасли [4, 5]. В данных справочниках приводятся технологии и отдельные технические решения, соответствующие принципам НДТ, а также ключевые показатели по ним.

Принципы НДТ подразумевают технологически минимально возможное образование отходов как неизбежного и неотъемлемого элемента процесса переработки минерального сырья определенным способом, в основе которого лежит химический процесс. Кроме минимального удельного выхода, НДТ должна обеспечивать и минимальное содержание примесей в побочном продукте, что с одной стороны, является критерием высокой степени использования исходного сырья по целевым компонентам и минимизации потерь, а с другой - обеспечивает практическое отсутствие воздействия на окружающую среду за счет минимизации содержания примесей и вероятности их попадания в окружающую среду [6]. Исследованию уровней риска окружающей среды и здоровья населения от воздействия различных загрязняющих веществ посвящено много научных статей [7, 8].

³ Соглашение было подготовлено взамен Киотского протокола [подписан в Киото (Япония) в декабре 1997 г. 159 государствами. Список парниковых газов, подлежащих ограничению, включает двуокись углерода (CO₂) и метан (CH₄), закись азота (N₂O), перфторуглероды (ПФУ), гидрофторуглероды (ГФУ) и гексафторид серы (SF₆)] в ходе Конференции по климату в Париже и принято консенсусом 12 декабря 2015 г., а подписано 22 апреля 2016 г.

Особенностью различных применяемых технологий минеральных фосфорсодержащих удобрений является концентрирование и переработка получаемых суспензий с последующей сушкой гранул удобрений, в результате чего производство имеет относительно высокое удельное потребление горючего топлива (от 0,05 до 0,30 Гкал/т продукции) для получения необходимого тепла, а также существенные объемы отходящих газов (от 0,01 до 0,07 т CO₂/т продукции). Указанные данные взяты из регламентных показателей действующих производств минеральных удобрений.

Анализ параметров работы различных технологических установок показывает, что в большинстве случаев энергоэффективность производства гранулированных удобрений может быть существенно повышена за счет реализации двух ключевых подходов:

1) Организация технологического процесса с более полным использованием тепла экзотермических реакций;

2) Применение комплекса мероприятий, направленных на использование (рекуперацию) тепла от внутренних и внешних тепловых потоков установки – вторичных энергетических ресурсов (ВЭР)⁴.

Известно, что наиболее энергоэффективные и экономичные технологии удобрений на основе фосфатов аммония базируются на использовании экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) преимущественно в упаренном виде (концентрация не ниже 48% P₂O₅) и максимальном использовании тепла реакции нейтрализации фосфорной кислоты и серной кислоты аммиаком за счет реализации схемы с трубчатым реактором (одностадийная схема нейтрализации), в котором нейтрализация протекает под избыточным давлением и при повышенной температуре, или же реализации комбинированной схемы с использованием связки аппаратов нейтрализации «предварительный нейтрализатор и трубчатый реактор» (двухстадийная схема нейтрализации). За счет реализации вышеуказанных способов организации производства на стадию гранулирования и сушки поступает суспензия (пульпа) с минимально возможным содержанием воды, но при этом суспензия сохраняет свою

⁴ Вторичные энергетические ресурсы (ВЭР) – ресурсы, полученные в виде отходов производства и потребления или побочных продуктов в результате осуществления технологического процесса или использования оборудования, функциональное назначение которого не связано с производством соответствующих видов энергетических ресурсов (ФЗ от 23 ноября 2009 г. N 261 -ФЗ).

технологическую подвижность при заданных условиях процесса.

Анализ показателей производства гранулированного моноаммонийфосфата (МАФ) позволил установить, что использование упаренной ЭФК и реализация двухстадийной или одностадийной схемы нейтрализации в трубчатых реакторах при

работе технологической системы по схеме с барабанным смесителем-гранулятором (схема с БГС) или по схеме с аммонизатором-гранулятором (АГ) и сушильным барабаном (СБ) (схема АГ-СБ) позволяет существенно сократить удельное потребление природного газа и сократить удельные выбросы углекислого газа, см. табл. 1.

Таблица 1

Показатели гранулированного МАФ по различным схемам организации технологии
Table 1. Indicators of granular MAP according to various schemes of technology organization

Способ производства	Производительность, т/ч	Влажность перерабатываемой пульпы, масс. %	Удельное потребление природного газа ⁵ , нм ³ /т	Удельное образование углекислого газа ⁶ , т CO ₂ /т
Одностадийная нейтрализация с использованием неупаренной ЭФК (не менее 35% Р ₂ О ₅) / схема с БГС	35-50	32-35	35-38	0,071-0,077
Двухстадийная нейтрализация с частичной долей упаренной ЭФК (20-30% от общего количества Р ₂ О ₅) / схема с БГС	40-60	31-33	34-36	0,069-0,073
Двухстадийная нейтрализация с частичной долей упаренной ЭФК (40-50% от общего количества Р ₂ О ₅) / схема с БГС	50-70	28-29	24-28	0,049-0,057
Двухстадийная нейтрализация с 100% долей упаренной ЭФК / схема с БГС	50-70	18-22	15-18	0,030-0,036
Одностадийная нейтрализация в трубчатых реакторах с 100% долей упаренной ЭФК / схема с БГС	50-60	12-15	8-10	0,016-0,020
Одностадийная нейтрализация в трубчатых реакторах / схема с АГ-СБ	60-100	10-12	7-8	0,014-0,016

В случае производства гранулированного диаммонийфосфата (ДАФ) за счет более глубокой аммонизации (пульпа сохраняет технологическую подвижность при относительно низкой влажности до 10% и ниже) в технологическом процессе выделяется большее количество тепла, которое также возможно использовать для удаления влаги из получаемых суспензий фосфатов аммония, см. табл. 2.

Результаты исследования зависимости химического и фазового состава, а также структуры и физико-механических характеристик гранулированных образцов удобрений от степени нейтрализации промышленной экстракционной фосфорной кислоты аммиаком, выраженной значением мольного отношения $[\text{NH}_3]:[\text{H}_3\text{PO}_4]$ представлены в статьях [9-11].

Приведенные в табл. 2 производственные показатели наглядно показывают эффективность применения технологических схем с использованием трубчатых реакторов (ТР) или тандема аппаратов «преднейтрализатор – ТР» в случае задействования преобладающей доли ЭФК в упаренном виде. Однако, применимость этих методов энергосбережения определяется, прежде всего, возможностью получения упаренной ЭФК и/или возможностью получения нейтрализованной суспензии фосфатов аммония с пониженной влажностью. Такая возможность может быть существенно ограничена в тех случаях, когда получаемая методом экстракции неупаренная ЭФК содержит повышенное количество примесей, таких как соединения магния, железа, алюминия, а также фтора и кремния,

⁵ Регламентные показатели действующих производств минеральных удобрений, плотность природного газа 0,7670 кг/нм³ (температура газа 0 °С и давление 101,325 кПа (760 мм рт. ст.))

⁶ При сжигании 1 кг природного (трубопроводного) газа образуются 2,64 кг углекислого газа и 2,09 кг водяного пара

которые при упаривании и дальнейшей нейтрализации образуют плохо растворимые соли сложного состава. В результате выпадения солевого осадка переработка такой суспензии затруднена из-за забивки транспортных и циркуляционных трубопроводов и внутренних поверхностей аппаратов, прежде всего, рабочих поверхностей теплообменных аппаратов и реакторов. Многие ученые занимаются разработкой новой эффективной гидрохимической технологии переработки апатитового концентрата, позволяющей получать в качестве продукта фосфорную кислоту с пониженным содержанием примесей, использовать все ценные компоненты апатитового концентрата [12, 13].

В вышеуказанном случае возможность применяемых методов по снижению влажности образующейся суспензии фосфатов аммония существенно ограничивается и для выпаривания и сушки приходится использовать только тепло топочных газов.

Развивая в дальнейшем концепцию получения суспензий (пульп) с низкой влажностью за счет использования на стадии нейтрализации трубчатой реакционной техники, технически возможными и экономически целесообразными являются и энергосберегающие и природоохранные мероприятия, указанные ниже.

Таблица 2

Показатели гранулированного ДАФ по различным схемам организации технологии
Table 2. Indicators of granular DAP according to various schemes of technology organization

Способ производства	Производительность, т/ч	Влажность перерабатываемой пульпы, масс. %	Удельное потребление природного газа ⁷ , нм ³ /т	Удельное образование углекислого газа ⁸ , т CO ₂ /т
Двухстадийная нейтрализация с частичной долей упаренной ЭФК (40-50% от общего количества Р ₂ О ₅) / схема с БГС	50-70	15-20	15-17	0,030-0,034
Двухстадийная нейтрализация с 100% долей упаренной ЭФК / схема с БГС	50-70	12-15	8-10	0,016-0,020
Одностадийная нейтрализация в трубчатых реакторах с 100% долей упаренной ЭФК	50-60	12	10	0,020
Одностадийная нейтрализация в трубчатых реакторах / схема с АГ-СБ	60-100	8-10	6-7	0,012-0,014

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО АММИАКА ВЗАМЕН ЖИДКОГО АММИАКА НА СТАДИИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПУЛЬП

Одним из решений, позволяющим снизить расход природного газа при работе технологических систем, является перевод работы трубчатых реакторов на смесь газообразного (АМГ) и жидкого (АМЖ) аммиака.

При использовании жидкого аммиака значительная часть тепла (порядка 50%), выделяющаяся в результате протекания реакции нейтрализации кислот, затрачивается на его испарение.

Перевод работы трубчатых реакторов на смесь жидкого и газообразного аммиака, т.е. подача части аммиака, идущего на стадию нейтрализации, в газообразном виде позволяет за счет до-

полнительного подведенного тепла поднять температуру пульпы в смесительной камере (при повышении давления) и по длине пульпопровода, снизить влажность пульпы на выходе из смесителей-нейтрализаторов, при сохранении ее текучести, и тем самым снизить потребление природного газа, требующегося для получения горячего теплоносителя для сушки пульпы.

Для перевода аммиака из жидкого в газообразное состояние требуется тепло для его испарения. Решением является строительство установки испарения жидкого аммиака (УИА) с использованием для его испарения различных типов промежуточных теплоносителей:

- насыщенного водяного пара давлением 0,5 - 0,6 МПа, который используется на УИА на одном из химических предприятий для обеспечения

⁷ Регламентные показатели действующих производств минеральных удобрений, плотность природного газа 0,7670 кг/ нм³ (температура газа 0 °С и давление 101,325 кПа (760 мм рт. ст.))

⁸ При сжигании 1 кг природного (трубопроводного) газа образуются 2,64 кг углекислого газа и 2,09 кг водяного пара

цеха фосфорных удобрений газообразным аммиаком. Расход пара при производительности установки до 53 т/ч по газообразному аммиаку составляет до 30 т/ч, что эквивалентно сжиганию до 2000 м³/ч природного газа и соответствует выбросу до 3700 кг/ч углекислого газа. Указанные данные взяты из регламентных показателей действующих производств минеральных удобрений;

- альтернативных источников тепловой энергии (тепловых ВЭР и ВИЭ⁹):

а) нагретой воды из системы оборотного водоснабжения ЦВСиК (классифицируется, как тепловой ВЭР);

б) «внешнего» (температура 22-36 °С) и «внутреннего» (температура 33-45 °С) оборотного цикла производства экстракционной фосфорной кислоты (ПЭФК);

в) оборотного цикла производства серной кислоты (СКП) (температура 28-38 °С);

г) атмосферного воздуха, как возобновляемого источника энергии (ВИЭ).

В теплый период года, когда уличная температура поднимается выше 15 °С и атмосферный воздух обладает достаточной тепловой энергией, его можно использовать в качестве промежуточного теплоносителя для испарения жидкого аммиака. На одном из химических предприятий была создана установка, которая предназначена для охлаждения в теплое время года атмосферного воздуха (до минус 1-5 °С), подаваемого в охлаждающие барабаны для обеспечения охлаждения гранул фосфорных удобрений до требуемой температуры, за счет испарения жидкого аммиака и выдачи газообразного аммиака с установки в производство минеральных удобрений.

Исследованию объектов, полезных для создания технологий, удовлетворяющих требованиям строящейся экономики замкнутого цикла, основанной на широком использовании возобновляемых ресурсов, максимальной переработке вторичного сырья, имеющей в качестве одной из задач переход от ископаемого топлива к использованию возобновляемых источников энергии, посвящены ряд работ [14].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛА ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ С ЦЕЛЬЮ ЗАМЕЩЕНИЯ ЧАСТИ ТЕПЛА, ТРЕБУЕМОГО ДЛЯ СУШКИ УДОБРЕНИЙ

В наиболее производительных технологических процессах, как правило, стадии гранулирования и сушки отделены друг от друга, например,

в технологической схеме с использованием аммонизатора-гранулятора и сушильного барабана. В такой технологии подача нейтрализованной пульпы, а также выделение пара из трубчатых реакторов, осуществляется в аммонизаторе-грануляторе, и потому возможность полезного использования тепла такого пара затруднена или невозможна. В случае же установки дополнительного трубчатого реактора в сушильный барабан появляется возможность использования тепла химической реакции нейтрализации фосфорной и серной кислот аммиаком для сушки удобрений за счет выделения пара в сушильный объем барабана. То есть выделяемый в результате реакции «эндогенный пар» дополнительно нагревает топочные газы, поступающие из топочного устройства, и тем самым частично замещая тепло от сжигания природного газа [15-20]. Проведенные инженерные расчеты применительно к технологическим условиям производства комплексных удобрений позволили установить, что для большинства выпускаемых марок удобрений возможно сократить потребление природного газа до 30-50% от существующего, что в свою очередь позволяет снизить выброс парниковых газов от 30 до 50% от существующего выброса.

Вторым важным подходом в решении задачи энергосбережения в производстве минеральных удобрений является применение концепции, основанной на использовании альтернативных источников тепловой энергии в виде вторичных энергетических ресурсов (тепловых ВЭР), включая:

- газовые тепловые отходы производства удобрений такие, как отработанный теплый воздух со стадии охлаждения готового продукта, очищенные влажные газы от сушильных установок (от БГС, сушильных барабанов) после абсорбции;

- тепло низкопотенциального насыщенного водяного пара из заводских сетей (от сторонних установок).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ДЛЯ ПОДОГРЕВА ВОЗДУХА, ПОДАВАЕМОГО В ТОПОЧНО-ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО СТАДИИ СУШКИ УДОБРЕНИЙ

Развитие теплообменной техники сделало возможным использование в технологии удобрений современных доступных эффективных теплообменников для подогрева воздуха, подаваемого в топочно-горелочное устройство стадии сушки

⁹ ВИЭ – возобновляемые источники энергии. Источники энергии, образующиеся на основе постоянно существующих или периодически возникающих процессов в природе, а также

жизненном цикле растительного и животного мира и жизнедеятельности человеческого общества (см. ГОСТ Р 52104).

удобрений. Примером таких теплообменников являются пластинчатые газовоздушные рекуператоры тепла ОПТ-типа (Оребренный Панельный Теплообменник). Эти высокоэффективные компактные рекуператоры нового поколения позволяют вернуть в технологический цикл более 40% выбрасываемой тепловой энергии. Конструкция новых рекуператоров проста. Она представляет собой «слоеный пирог» в виде чередующихся полостей для нагревающей и нагреваемой сред.

Указанный тип теплообменников успешно

применяется на химических предприятиях в серно-кислотном производстве. Аналогичное решение предлагается применить и в производстве удобрений для подогрева воздуха, подаваемого в топку сушильного барабана или БГС для сушки удобрений (см. рис. 1). При этом, по нашему мнению, наиболее целесообразно использовать тепло отходящих газов после «мокрой очистки» в так называемой «холодной зоне» газового тракта для подогрева воздуха в топку.

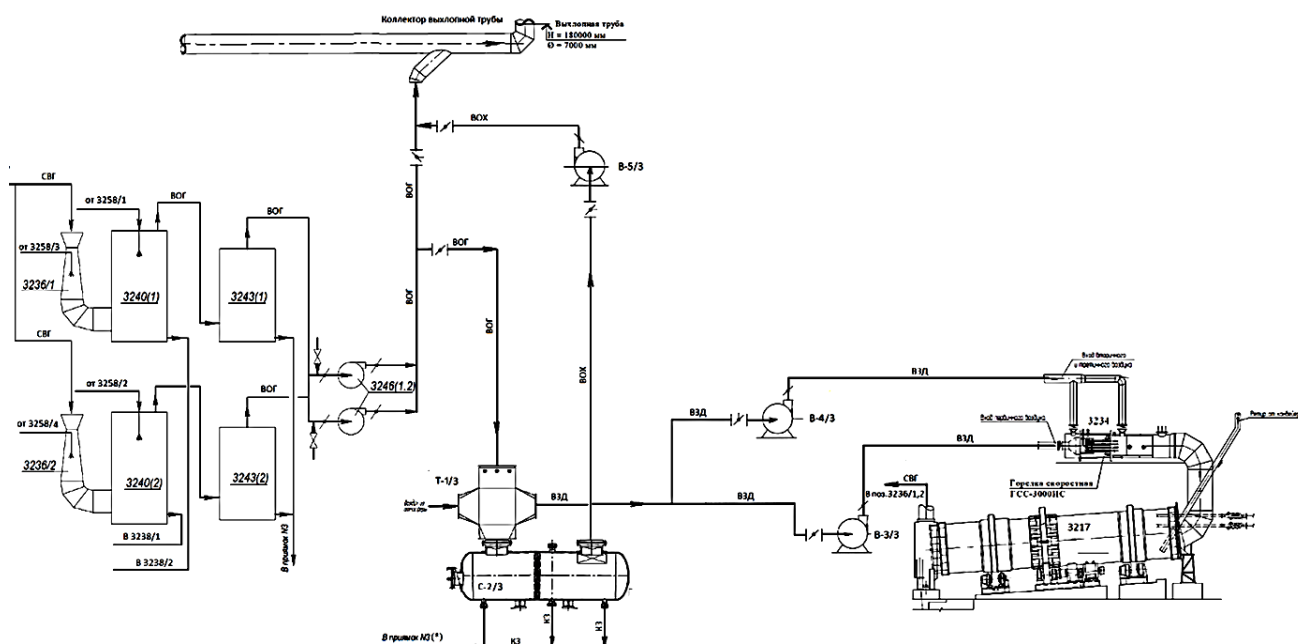


Рис. 1. Установка подогревателя воздуха ОПТ-типа (Оребренный Панельный Теплообменник) в схеме рекуперации тепла отходящих газов после «мокрой очистки» в т.н. «холодной зоне» газового тракта для подогрева воздуха в топочно-горелочное устройство стадии сушки удобрений (Т-1/3 – Подогреватели воздуха ОПТ-типа; С-2/3 – Горизонтальный сепаратор; В-3/3 и В-4/3 – Дымосос; 5/3 – Вентилятор; 3217 – Сушильный барабан; 3234 – Горелка скоростная ГСС-3000ИС; 3236/1,2 – Скруббер «Вентури»; 3240/1,2 – Полая башня; 3243/1,2 – Брызгоуловитель; 3246/1,2 – Вентилятор)

Fig. 1. Installation of an air heater (OPT-type) in the scheme of heat recovery of exhaust gases after "wet cleaning" in the so-called "cold zone" of the gas path for heating air into the furnace-burner device of the fertilizer drying stage. (T-1/3 – OPT-type air heaters; S-2/3 – Horizontal separator; B-3/3 and B-4/3 – Smoke exhauster; 5/3 – Fan; 3217 – Drying drum; 3234 – High-speed burner GSS-3000IS; 3236/1,2 – Venturi scrubber; 3240/1,2 – Hollow tower; 3243/1,2 – Splash trap; 3246/1,2 – Fan)

Выполненные расчеты позволили установить, что при реализации данной схемы можно ожидать экономию по природному газу от 10 до 15% от текущего потребления. Вместе с тем, реализация сопряжена с существенными капитальными затратами при относительно небольшом сокращении количества выбрасываемого углекислого газа. Поэтому данное мероприятие необходимо рассматривать наряду с конкурирующими мероприятиями по энергосбережению и сокращению выброса парниковых газов.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ (ПОДОГРЕТОГО ВОЗДУХА) ОТ КОНВЕКТИВНЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ УДОБРЕНИЙ

Применение на стадии очистки современных эффективных рукавных фильтров с импульсной продувкой дает возможность использования отходящих газов со стадии охлаждения удобрений в качестве дополнительного теплоносителя на стадии сушки. При этом отходящие газы со стадии охлаждения могут смешиваться с теплоносителем, образующимся при сжигании природного газа.

Кроме того, поток воздуха, направляясь в сушильный барабан, не идет в систему очистки газов, тем самым снижая нагрузку на абсорбционное оборудование. Рукавные фильтры с импульсной продувкой характеризуются простотой сборки и удобством в эксплуатации. Недостаток данного типа оборудования – они требуют достаточно большого рабочего пространства и дополнительного оборудования.

Нагретый в аппаратах «кипящего» слоя (КС) запыленный воздух поступает на двухступенчатую очистку. Первая ступень – грубая очистка в циклонах от частиц крупных и средних размеров и тонкая очистка на рукавных фильтрах от частиц мелких размеров. Эффективность очистки воздуха по такой схеме составляет 99% и выше. Далее очищенный воздух поступает в специально разрабо-

танную (под требуемые расходы отходящего запыленного воздуха) камеру смешения, расположенную на газоходе сразу после топочно-горелочного устройства. Образующийся в камере смешения теплоноситель поступает в сушильный барабан, блок-схему см. рис. 2.

Проведенные инженерные расчеты для двух возможных вариантов ведения процесса сушки для большинства выпускаемых марок удобрений показали возможность сокращения потребления природного газа на 10-15%: для стандартного режима сушки без увеличения объема теплоносителя с температурой на входе в сушильный барабан 450-550 °С и для режима «мягкой» сушки с увеличением объема теплоносителя на 30-40% и с температурой на входе в сушильный барабан 200-300 °С.

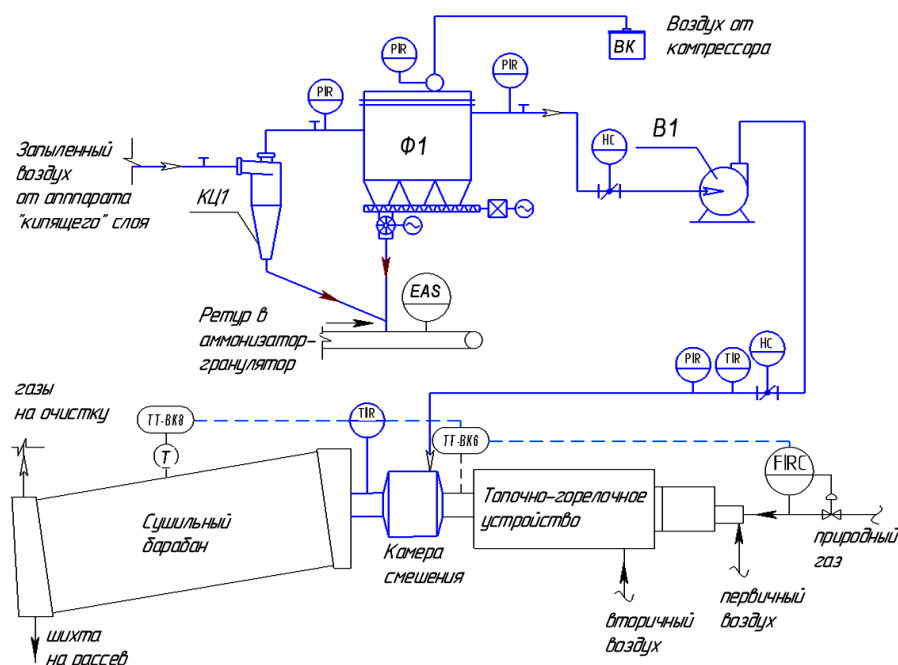


Рис. 2. Блок-схема подачи очищенного от пыли горячего потока воздуха в камеру смешения, расположенную на газоходе, идущему от топки в сушильный барабан (КЦ1 – Циклон конический; Ф1 – Рукавные фильтры; ВК – Воздушный компрессор; В1 – Вентилятор)
Fig. 2. Block diagram of the supply of a dust-free hot air stream to the mixing chamber located on the flue running from the furnace to the drying drum

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНДУКТИВНЫХ АППАРАТОВ НА СТАДИИ ОХЛАЖДЕНИЯ УДОБРЕНИЙ

В настоящее время в промышленной практике охлаждения гранулированных удобрений широко распространено применение аппаратов «кипящего слоя» (КС). Они имеют высокую эффективность охлаждения, высокую производительность (до 150 т/ч), простоту в эксплуатации, но значимыми ограничениями их использования является вы-

сокое энергопотребление и необходимость очистки больших объемных расходов отходящих газов. Для таких установок используются высоконапорные дутьевые вентиляторы для обеспечения «кипящего» слоя в аппаратах, а также высоконапорные хвостовые вентиляторы, способные обеспечить протяжку большого количества запыленного воздуха, выходящего из аппарата КС, через аппараты сухой и мокрой очистки, обладающие существенным сопротивлением. Значительная доля энергозатрат узла охлаждения удобрений приходится на дутьевые и хвостовые вентиляторы.

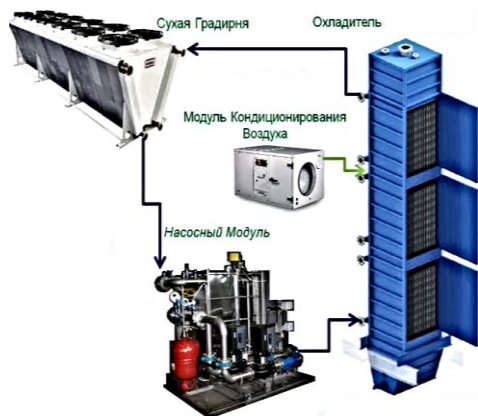


Рис. 3. Установка охлаждения удобрений с применением кондуктивного аппарата
Fig. 3. Fertilizer cooling installation using a conductive apparatus

Применение на стадии охлаждения удобрений кондуктивных аппаратов взамен аппаратов КС позволяет существенно снизить энергопотребление и объемы выбросов отходящих газов от технологических систем удобрений. На рис. 3 показан пример установки кондуктивного аппарата, в котором проводится охлаждение удобрений этиленгли-

колевой смесью, циркулирующей в замкнутом контуре при помощи насосного модуля и охлаждающей атмосферным воздухом в сухой градирне. Для исключения конденсации влаги в корпус охладителя в небольшом количестве подается осушенный воздух. Энергозатраты приходятся только на насосы подачи этиленгликолевой смеси, воздушные вентиляторы «сухой» градирни и небольшой вентилятор подачи осушенного воздуха.

Примером существенного снижения потребления электроэнергии является модернизация узла охлаждения с установкой кондуктивных теплообменников на одном из химических предприятий. Повышение эффективности работы узла охлаждения позволило увеличить производительность технологических систем в теплое время года на 10-15 т/ч. Снижение потребления электроэнергии (табл. 3) в совокупности с увеличением производительности систем в летнее время года позволило снизить удельный расход электроэнергии при выпуске различных марок удобрений с 0,05 тыс. кВт·ч/т до 0,045 тыс. кВт·ч/т продукта. Таким образом, кондуктивные охладители удобрений позволяют экономить до 5 кВт·ч/т продукта.

Таблица 3

Потребление электроэнергии установками охлаждения удобрений с применением аппаратов КС и кондуктивных аппаратов при производительности систем 100 т/ч
Table 3. Electricity consumption by fertilizer cooling plants using fluidizing bed devices and conductive devices at a system capacity of 100 t/h

Оборудование, потребляющее электроэнергию на установке с аппаратом КС	Потребляемая мощность ¹⁰ , кВт·ч	Оборудование, потребляющее электроэнергию на установке с кондуктивным аппаратом	Потребляемая мощность ¹⁰ , кВт·ч
Дутьевой вентилятор	320	Вентиляторы двух «сухих» градирен	75
Хвостовой вентилятор	320	Вентилятор осушки воздуха	40
		Насосы подачи охлаждающей смеси	25
Итого	640	Итого	140
Снижение потребления электроэнергии при производительности систем 100 т/ч	$(640 - 140) / 100 = 5 \text{ кВт·ч/т}$		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что в статье обозначены два ключевых подхода по организации технологического процесса, реализация которых позволяет существенно повысить энергоэффективность производства гранулированных удобрений. Некоторые из примеров реализации таких мероприятий на химических предприятиях представлены в данной статье, приведены данные по эффектам энергосбережения и сокращения вы-

броса парниковых газов. При разработке организации производства, разработке технологий и проектировании техперевооружения и нового строительства применялись принципы НДТ, включая реализацию мероприятий по энергосбережению.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

¹⁰ Регламентные показатели действующих производств минеральных удобрений

ЛИТЕРАТУРА

1. **Eggleton R.A.** A short introduction to climate change. Cambridge: CUP. 2012. 240 p. DOI: 10.1017/CBO9781139524353.
2. **Левин Б.В.** Новые энергоэффективные решения в производстве минеральных удобрений. *Тр. НИУИФ 1919-2014*: сб. науч. трудов. М. 2014. С. 20-26.
3. **Аксенчик К.В.** Эволюция и перспективы энерго- и ресурсосберегающих подходов в технологии аммиака. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 1. С. 4-21. DOI: 10.6060/ivkkt.20216401.6310.
4. Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals - Ammonia, Acids and Fertilisers, August 2007.
5. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС-2022. Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот. М.: Бюро НДТ. 2022. 838 с.
6. **Петропавловский И.А.** Технология минеральных удобрений. СПб.: Проспект Науки. 2018. 312 с.
7. **Куленцан А.Л., Марчук Н.А.** Анализ воздействия на человека и окружающую среду загрязняющих веществ. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 1. С. 116-121. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6531.
8. **Куленцан А.Л., Марчук Н.А.** Влияние на человека загрязняющих веществ в г. Москва. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 9. С. 129-137. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6619.
9. **Колпаков В.М., Норов А.М., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Кочетова И.М., Петропавловский И.А.** Влияние степени нейтрализации фосфорной кислоты на свойства нитратсодержащих азотно-фосфорно-калийных удобрений. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 3. С. 52-58. DOI: 10.6060/ivkkt.20216403.6289.
10. **Кувшинников И.М.** Минеральные удобрения и соли: свойства и методы их улучшения. М.: Химия. 1987. 256 с.
11. **Колпаков В.М., Норов А.М., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Горбовский К.Г., Михайличенко А.И.** Исследование влияния степени аммонизации фосфорной кислоты на термостабильность комплексных нитратсодержащих удобрений. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 19. Вып. 10. С. 434-441. DOI: 10.31044/1684-5811-2018-19-10-434-440.
12. **Локшин Е.П., Тареева О.А., Седнева Т.А., Елизарова И.Р.** Получение фосфорной кислоты сорбционной конверсией апатитового концентрата с использованием сульфокатионита в натриевой или калиевой формах. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 1. С. 78-85. DOI: 10.6060/ivkkt.20206301.5851.
13. **Сизайков В.М., Нутрихина С.В., Левин Б.В.** Технология комплексной переработки фосфогипса методом конверсии для производства сульфата аммония, фосфомела и новых продуктов. *Зап. Горн. Ин-та*. 2012. Т. 197. С. 239-244.
14. **Темнов М.С., Устинская Ю.В., Ескова М.А., Дворецкий С.И., Дворецкий Д.С., Лабути А.Н.** Вопросы интеграции технологий очистки сточных вод и производства возобновляемых источников энергии. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 12. С. 125-134. DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.6108.
15. **Норов А.М., Иванычев С.В., Козлова Е.В., Рыбин Е.А., Медников Д.С., Цикин М.Н., Соколов В.В., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Торшин С.П., Лапушкин В.М., Лапушкина А.А., Игналиев Ф.Г.** Пути реше-

REFERENCES

1. **Eggleton R.A.** A short introduction to climate change. Cambridge: CUP. 2012. 240 p. DOI: 10.1017/CBO9781139524353.
2. **Levin B.V.** New energy efficient solutions in the mineral fertilizers production. *Trudy NIUIF 1919-2014*: Coll. of scientific reports. M.: NIUIF. 2014. pp. 20-26 (in Russian).
3. **Aksenchik, K.V.** Evolution and prospects of energy- and resource-saving approaches in ammonia technology. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 1. P. 4-21. DOI: 10.6060/ivkkt.20216401.6310.
4. Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals - Ammonia, Acids and Fertilisers, August 2007.
5. Information and technical handbook on the best available technologies ITS 2–2022. Production of ammonia, mineral fertilizers and inorganic acids. Moscow: NDT Bureau. 2022. 838 p. (in Russian).
6. **Petropavlovskiy I.A.** Technology of mineral fertilizers. SPb.: Prospekt Nauki. 2018. 312 p. (in Russian).
7. **Kulentsan A.L., Marchuk N.A.** Analysis of the impact of pollutants on humans and the environment. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 1. P. 116-121. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6531.
8. **Kulentsan A.L., Marchuk N.A.** Human impact of pollutants in Moscow. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 9. P. 129-137. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6619.
9. **Kolpakov V.M., Norov A.M., Pagaleshkin D.A., Fedotov P.S., Kochetova I.M., Petropavlovskiy I.A.** The effect of the degree of neutralization of phosphoric acid on the properties of nitrate-containing nitrogen-phosphorus-potassium fertilizers. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 3. P. 52-58. DOI: 10.6060/ivkkt.20216403.6289.
10. **Kuvshinnikov I.M.** Mineral fertilizers and salts: properties and methods for their improvement. M.: Khimiya. 1987. 256 p. (in Russian).
11. **Kolpakov V.M., Norov A.M., Pagaleshkin D.A., Fedotov P.S., Gorbovskiy K.G., Mikhaylichenko A.I.** Investigation of the phosphoric acid ammonization degree effect on the thermal stability of complex nitrate-containing fertilizers. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2018. V. 19. N 10. P. 434-441 (in Russian). DOI: 10.31044/1684-5811-2018-19-10-434-440.
12. **Lokshin E.P., Tareeva O.A., Sedneva T.A., Elizarova I.R.** Production of phosphoric acid by sorption conversion of apatite concentrate using sulfocationite in sodium or potassium forms. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 1. P. 78-85. DOI: 10.6060/ivkkt.20206301.5851.
13. **Sizaikov V.M., Nutrikhina S.V., Levin B.V.** The technology of complex processing of phosphogypsum by the conversion method to produce ammonium sulfate, phosphomel and new products. *Zap. Gorn. In-ta*. 2012. V. 197. P. 239-244 (in Russian).
14. **Temnov M.S., Ustinskaya Y.V., Yeskova M.A., Dvoretzky S.I., Dvoretzky D.S., Labutin A.N.** Issues of integration of wastewater treatment technologies and production of renewable energy sources. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 62. N 12. P. 125-134. DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.6108.
15. **Norov A.M., Ivanychev S.V., Kozlova E.V., Rybin E.A., Mednikov D.S., Tsikin M.N., Sokolov V.V., Pagaleshkin D.A., Fedotov P.S., Torshin S.P., Lapushkin V.M.,**

- ния вопросов устойчивого развития и климатической повестки в производствах минеральных удобрений: возможности, технологии, продукты. Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы создания и использования высоких технологий переработки минерально-сырьевых ресурсов Узбекистана, посвященная 90-летию со дня создания Института общей и неорганической химии АН Республики Узбекистан (16-17 ноября 2023 года). Ташкент. 2023. С. 67-68.
16. **Норов А.М., Рыбин Е.А., Медников Д.С., Цикин М.Н., Соколов В.В., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Торшин С.П., Лапушкин В.М., Лапушкина А.А., Игалиев Ф.Г.** «Зеленые» технологии, разрабатываемые в АО «НИУИФ». В сб. Инновации и «зеленые» технологии. Сб. матер. и докл. IV Всеросс. конф. (Самара, 9 ноября 2023г.). Самара. 2024. С. 125-133.
17. **Пагалешкин Д.А., Норов А.М., Федотов П.С., Медников Д.С.** Интенсификация производства фосфорсодержащих удобрений. Труды НИУИФ: к 105-летию основания института. Вологда: Древности Севера. 2024. С. 207-212.
18. **Норов А.М., Соколов В.В., Рыбин Е.А., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Лапушкин В.М., Торшин С.П., Лапушкина А.А., Ф.Г. Игалиев** Инновационные высокоэффективные удобрения нового поколения. Тр. НИУИФ: к 105-летию основания института. Вологда: Древности Севера. 2024. С. 212-218.
19. **Норов А.М., Иванычев С.В., Козлова Е.В., Рыбин Е.А., Медников Д.С., Цикин М.Н., Соколов В.В., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Торшин С.П., Лапушкин В.М., Лапушкина А.А., Игалиев Ф.Г.** Возможности снижения выбросов парниковых газов и переработка отходов при производстве фосфорсодержащих удобрений. Тр. НИУИФ: к 105-летию основания института. Вологда: Древности Севера. 2024. С. 391-399.
20. **Норов А.М., Рыбин Е.А., Медников Д.С., Цикин М.Н., Соколов В.В., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Торшин С.П., Лапушкин В.М., Лапушкина А.А., Игалиев Ф.Г.** Технологии АО «НИУИФ», отвечающие принципам и задачам зеленой химии. Тр. НИУИФ: к 105-летию основания института. Вологда: Древности Севера. 2024. С. 399-406.
- Lapushkina A.A., Igraliev F.G.** Ways to solve issues of sustainable development and the climate agenda in the production of mineral fertilizers: opportunities, technologies, products. Materials of the international scientific Conference practical conference "Actual problems of creation the use of high technologies for processing mineral resources of Uzbekistan, dedicated to the 90th anniversary of its creation Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (November 16-17, 2023). Tashkent. 2023. P. 67-68.
16. **Norov A.M., Rybin S.A., Mednikov D.S., Tsikin M.N., Sokolov V.V., Pagaleshkin D.A., Fedotov P.S., Torshin S.P., Lapushkin V.M., Lapushkina A.A., Igraliev F.G.** «Green» technologies being developed at JSC «NIUIF»: at the sat. Innovation and green technologies. Collection of materials and reports of the IV All-Russian Conference (Samara, November 9, 2023). Samara. 2024. P. 125-133.
17. **Pagaleshkin D.A., Norov A.M., Fedotov P.S., Mednikov D.S.** Intensification of production of phosphorus-containing fertilizers, Proceedings of the National Research Institute: on the 105th anniversary of the establishment of the Institute. Vologda: Drevnosti severa. 2024. P. 207-212 (in Russian).
18. **Norov A.M., Sokolov V.V., Rybin E.A., Pagaleshkin D.A., Fedotov P.S., Lapushkin V.M., Torshin S.P., Lapushkina A.A., Igraliev F.G.** Innovative high-efficiency fertilizers of a new generation Proceedings of the National Research Institute of Natural Sciences: on the 105th anniversary of the founding of the Vologda. Vologda: Drevnosti severa. 2024. P. 212-218 (in Russian).
19. **Norov A.M., Ivanychev S.V., Kozlova E.V., Rybin E.A., Mednikov D.S., Tsikin M.N., Sokolov V.V., Pagaleshkin D.A., Fedotov P.S., Torshin S.P., Lapushkin V.M., Lapushkina A.A., Igraliev F.G.** Possibilities of reducing greenhouse gas emissions and recycling of waste in the production of phosphorus-containing fertilizers. Proceedings of the NIUIF: on the 105th anniversary of the founding of the Institute. Vologda: Drevnosti severa. 2024. P. 391-399 (in Russian).
20. **Norov A.M., Rybin E.A., Mednikov D.S., Tsikin M.N., Sokolov V.V., Pagaleshkin D.A., Fedotov P.S., Torshin S.P., Lapushkin V.M., Lapushkina A.A., Igraliev F.G.** Technical sciences of JSC «NIUIF» meeting the principles and objectives of green chemistry. Proceedings of the NIUIF to the 105th anniversary of the foundation of the Institute. Vologda: Drevnosti severa. 2024. P. 399-406 (in Russian).

Поступила в редакцию 04.12.2024

Принята к опубликованию 27.01.2025

Received 04.12.2024

Accepted 27.01.2025