

УДК 631.812.1

DOI 10.29039/2413-1725-2025-11-3-60-78

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ КОНВЕРТЕРНОГО ШЛАКА ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ» В КАЧЕСТВЕ ПОЧВЕННОГО МЕЛИОРАНТА

Баранчиков П. А.¹, Чеботарева С. П.¹, Захарова О. В.^{1,2}, Коява Э. Ю.¹, Гусев А. А.^{1,3}

¹*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия*

²*ФГБОУ ВО Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, Москва, Россия*

³*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*

E-mail: sweta-chebotarjova@yandex.ru

Проблема утилизации металлургических шлаков весьма актуальна. Перспективным направлением их использования является сельское хозяйство. Целью исследования был анализ воздействия конвертерного шлака на яровую пшеницу в лабораторных и полевых условиях для оценки возможного применения отхода в сельскохозяйственном производстве. В лабораторном эксперименте шлак не повлиял на всхожесть, но в закисленном грунте снизил сырью массу корней, а в нейтральном увеличил массу стеблей. В полевых условиях применение шлака повысило урожайность на слабокислой почве на 14 %, а на среднекислой на 16 %. Совместное использование шлака и удобрений дало дополнительную прибавку урожайности на 14,3 %. Также в зерне выросло содержание К на 16 %. Результаты обосновывают возможность использования конвертерного шлака в агротехнологиях.

Ключевые слова: конвертерный шлак, мелиоранты, раскисление почв, пшеница яровая.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее столетие в связи с ростом индустриализации увеличивается объем шлаковых отходов, образующихся при производстве чугуна и стали. Безопасная утилизация шлака является предметом серьезной озабоченности во всех странах-производителях стали. Основной упор делается на более экологически чистое производство и интенсивную переработку отходов [1].

Сталеплавильный шлак – это богатое Ca гетерогенное твердое вещество, состоящее из нескольких твердых фаз. Ca в шлаке может существовать в нескольких формах: CaCO₃, CaO, Ca₂SiO₄, Ca₃SiO₅ или Ca₂(Al,Fe)₂O₅ [2, 3]. Химический состав сталеплавильного шлака может сильно различаться и зависеть от используемого сырья, условий и процессов производства стали [4].

В условиях сокращения запасов минерального сырья, рециклинг техногенных отходов в черной металлургии является эффективным инструментом, способствующим более рациональному и комплексному использованию доступных ресурсов. Одним из основных применений металлургического шлака является его использование в качестве заполнителя при производстве бетона [5–7]. Учитывая, что заполнитель составляет около 70–75 % веса бетона, использование шлака позволит частично или полностью заменить природные заполнители [7]. В настоящее время

шлак можно рассматривать как возможное сырье для керамики [8, 9], дорожного строительства [10, 11] или производства цемента [12, 13]. Добавление доменного шлака в цемент позволяет избежать извлечения известняка и угля и позволяет снизить выбросы CO_2 , вызывающие загрязнение окружающей среды [7].

Перспективным направлением использования шлака металлургического производства является сельское хозяйство. В силу своего компонентного состава шлак может стать заменой традиционных известковых препаратов для мелиорации закисленных почв. Внесение шлака способствует увеличению рН и доступности питательных веществ, таких как Ca, Mg и Si в почве, что приводит к увеличению поглощения этих элементов растением, способствуя росту и урожайности сельскохозяйственных культур [14]. В последние годы несколько исследований показали, что внесение удобрений на основе шлака имеет большие перспективы в агрохимической практике [15–17]. В работе Дас со авторами [18] отмечено, что удобрения на основе шлаков могут способствовать снижению токсичности тяжелых металлов в почве и растениях, что достигается благодаря содержанию в отходах Fe. Также авторами сообщается, что повышение урожайности культур при внесении шлаковых удобрений в значительной степени регулируется микробным разложением органического вещества и мобилизацией питательных веществ. Кроме того, содержание Ca в шлаковом удобрении делает корни крепкими и способствует усвоению K, что важно для роста растений. Согласно данным работы [19] внесение шлака способствовало увеличению урожайности кукурузы, что связано с улучшением снабжения растений Fe, Mg, Mn, K и P. Исследования на томатах [20] выявили аналогичный эффект, обусловленный положительным влиянием шлака на снижение содержания обменного Na и повышение обеспеченности растений Ca и Mg в засоленных почвах. Исследования Мохаммади Торкашванд и Седагхатур выявили прямую зависимость между количеством внесенного шлака и повышением рН почвы [21]. Авторы отметили, что доступность Fe снижалась в диапазоне рН 7.4–8.5, а при более щелочных значениях, напротив, возрастала. Помимо этого, применение шлака способствовало повышению доступности P и Mn. В тепличных опытах внесение шлака (1 и 2 %) в почвы с разным рН (4.1 и 6.7) стимулировало увеличение сухой массы побегов кукурузы и, как следствие, поглощение P и Mn. Что касается поглощения Fe и K, наблюдалась зависимость от рН: увеличение в почве с рН 6.7 и снижение K в почве с рН 4.1 (поглощение Fe не изменилось). Другие исследователи показали, что использование удобрений на основе кремнийсодержащего шлака в почвах с дефицитом Si не только улучшает рост и урожайность риса, но и повышает его устойчивость к патогенам, в частности, к *Bipolaris oryzae* [22]. Увеличение насыщенности основаниями и доступности Si и P в почве, а также повышение урожайности риса и концентрации Si в рисовой соломе также связывают с внесением кремнийсодержащего шлака [23, 24]. Исследование с использованием бедных питательными веществами субстратов и шлака из электродуговой печи продемонстрировало улучшение минерального состава почвы, увеличение биомассы надземной части кукурузы и положительное влияние на параметры фотосинтеза [25]. Влияние Si, входящего в состав шлака, может проявляться в повышении устойчивости растений к избытку Fe и Mn [26], а также

Cd, Zn и Al [27]. Наконец, добавление измельченного гранулированного доменного шлака (3 % и 5 %) в почву, загрязненную Cd, привело к увеличению индекса площади листа и корня *Pinellia ternata* [28].

Однако есть работы, демонстрирующие отрицательное влияние металлургического шлака на растения. Снижение массы растений при их совместном культивировании со шлаковыми отходами отмечено в работе Беланова с соавторами [29]. Авторы связывают подобный эффект с высокими концентрациями используемых отходов и короткими сроками проведения опыта (около 2-х недель). Фитотоксическое действие металлургических шлаков, вероятно, определяется их физико-химическими характеристиками и избыточным содержанием свободных катионов Ca^{2+} и Fe^{2+} . Предполагается, что указанные металлы оказывают влияние на усвоение растениями ключевых элементов минерального питания, нивелируя даже эффект от внесения минеральных удобрений [30]. Следовательно, каждый шлак представляет собой уникальный субстрат, требующий всесторонней оценки при рассмотрении возможности его широкого применения в различных сферах [29].

Таким образом, интерес к металлургическим шлакам неуклонно растет, и из-за большого объема производства – более 400 млн. т. по всему миру ежегодно, необходимо понимать его роль как ценного ресурса [31]. Анализ результатов ряда исследований свидетельствует о перспективности применения конвертерного шлака в качестве полифункционального почвенного мелиоранта, обладающего раскисляющими свойствами и обеспечивающего растения доступными формами Si, P и Fe [16, 17]. При этом важно проведение исследований экологической безопасности шлаков в сельском хозяйстве для того, чтобы добиться более эффективного и рационального их использования, металлургических шлаков и, как следствие, более полной переработки [17, 18].

В настоящем исследовании мы оценивали показатели всхожести, роста и биологической продуктивности пшеницы яровой (сорт Злата) в лабораторном и полевом эксперименте под действием конвертерного шлака в грунте с различной кислотностью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1.1 Анализ конвертерного шлака

Объектом настоящего исследования послужил конвертерный шлак – побочный продукт, образующийся в процессе производства стали в открытых агрегатах на предприятии ПАО «Северсталь». Микроструктуру и элементный анализ образца шлака определяли методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе JEOL NeoScope JCM-7000 (Япония).

Рентгенофазовые и рентгеноструктурные исследования проводились при комнатной температуре на рентгеновском дифрактометре «Дифрей» (Россия).

1.2 Лабораторный эксперимент

С целью изучения воздействия конвертерного шлака на пшеницу яровую (*Triticum aestivum* L. (Poaceae)) (сорт Злата) в лабораторных условиях были

получены культивационные среды с концентрациями шлака 0.2, 2 и 20 г/кг грунта. Основой для сред использовали два типа торфа ("Огородник", Россия): нейтральный (рН водной вытяжки 6.5) и кислый (рН водной вытяжки 4.0). Полученный субстрат помещали в контейнеры объёмом 0.5 л, в которые впоследствии высевалось по 30 семян пшеницы.

Исследования проводились в лабораторных условиях при температуре окружающего воздуха от 18 до 24 °C, относительной влажности воздуха 85±2 %, атмосферном давлении 74–110 кПа (620–850 мм рт. ст), освещенности 4500 люкс.

Опыт проводился в трех аналитических повторностях. В качестве анализируемых показателей брали всхожесть, морфометрические параметры проростков (длина стебля, длина корня), сырая и сухая масса проростков.

1.3 Полевой эксперимент

Полевые исследования были направлены на сравнительную оценку эффективности конвертерного шлака в сравнении с традиционным известковым мелиорантом. Экспериментальная работа проводилась на базе ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина». Почвы опытных делянок дерново-подзолистые с разным уровнем кислотности – $\text{pH}_{\text{KCl}} = 5.4$ (слабокислая реакция почвенной среды) и $\text{pH}_{\text{KCl}} = 4.8–4.9$ (среднекислая реакция почвенной среды). В эксперименте использовались следующие нормы внесения мелиорантов: 2.4 т/га для почв с $\text{pH}_{\text{KCl}} = 5.4$ и 3 т/га для среднекислых почв ($\text{pH}_{\text{KCl}} = 4.8–4.9$).

Дозы удобрений (NPK), применяемые в опыте, рассчитывались на основе научно обоснованных рекомендаций для условий Вологодской области [32].

Повторность – 4-кратная, расположение делянок – усложнённое систематическое.

Полевые опыты сопровождались следующими исследованиями, наблюдениями и учетами:

1. Фенологические наблюдения проводили в течение вегетационного периода. В качестве критерия для фиксации начала фазы использовали появление признаков у 10 % растений, а для определения полного развития фазы – наличие этих признаков у 75 % растений [32–35].

2. Учет урожая проводился на основе рекомендаций по проведению научных исследований и методике опытного дела [33].

Вегетационный период характеризовался аномальными погодными условиями. Так, в мае фактическая температура месяца по данным наблюдений составила 12.5°. Отклонение от нормы: +1.6°. Сумма осадков в мае – 65 мм, что составляет 136 % от нормы. В летний период были выявлены повышенные температуры воздуха, особенно в первой половине лета, с дефицитом осадков. Фактическая температура июня по данным наблюдений: 19.9°, отклонение от нормы: +4.7°. Сумма осадков – 31 мм, что составляет 49 % от нормы. В июле средняя температура составила 19.8°, при норме – 17.7°, а количество осадков – 27 мм, при норме – 72 мм. В августе также наблюдалось температурное отклонение от нормы (+1.2°), при этом сумма осадков в этом месяце была выше нормы на 96 %.

В почвенных образцах определяли рН солевой вытяжки – потенциометрически (ГОСТ 26483-85), содержание Са и Mg (ГОСТ 26428-85), подвижные формы Р и К – по Кирсанову (ГОСТ Р 54650-2011), гидролитическую кислотность – по Каппену (ГОСТ 26212-2021), сумму поглощенных оснований по Каппену-Гильковицу (ГОСТ 27821-2020), гумус – по Тюрину (ГОСТ 26213-91), степень подвижных фосфатов – с использованием слабосолевой вытяжки 0.02 н. CaCl_2 (метод Скофилда), степень подвижности К – с использованием 0.005 н. CaCl_2 -вытяжки (метод ВИУА). В растительных образцах – содержание N товарной и нетоварной частей урожаев после мокрого озоления по К. Гинзбург и по Кельдалю, соответственно, подвижного Р – на фотоколориметре, К – на пламенном фотометре [36].

1.4 Статистическая обработка

Методы описательной статистики включали в себя оценку среднего арифметического (M), среднеквадратичного отклонения (S). Определение достоверности различий между качественными показателями сравниваемых групп проводили с использованием t-критерия Стьюдента и критерия Фишера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1 Физико-химический анализ шлака

На рис. 1 представлены микрофотографии образца конвертерного шлака. Как видно из СЭМ-изображений, гранулы преимущественно выражены неправильными многогранниками, а также прослеживается пористая структура, средний размер гранул 0.2–1.5 мм.

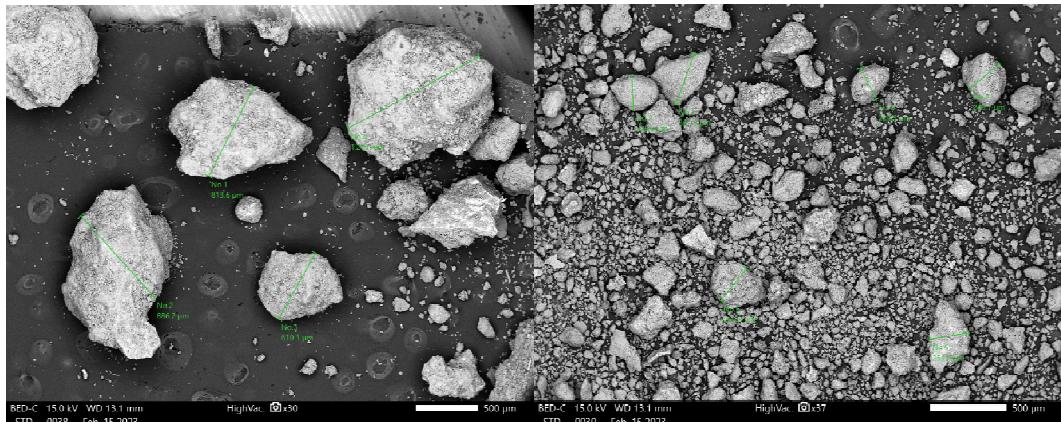


Рис. 1. СЭМ – изображение образца конвертерного шлака.

Элементный анализ исследуемого образца (табл. 1) показал, что помимо Са, С и О, в шлаке также присутствует Si (2–4 вес.-%), Mg (1.5–3 вес.-%), Al (1.5–2 вес.-%) и Fe (1.5–3 вес.-%). Кроме того, в небольших количествах зафиксированы Mn и S.

Таблица 1

Элементный состав образца шлака

Элемент	Вес, %
O	46.5
C	30.4
Ca	14.6
Si	2.6
Mg	2.1
Al	1.8
Fe	1.6
Mn	0.3
S	0.2

Методом рентгеноструктурного анализа (рис. 2) установлено, что Ca в образце находится преимущественно в фазах силиката, феррита и оксида, также присутствует фаза карбоната кальция.

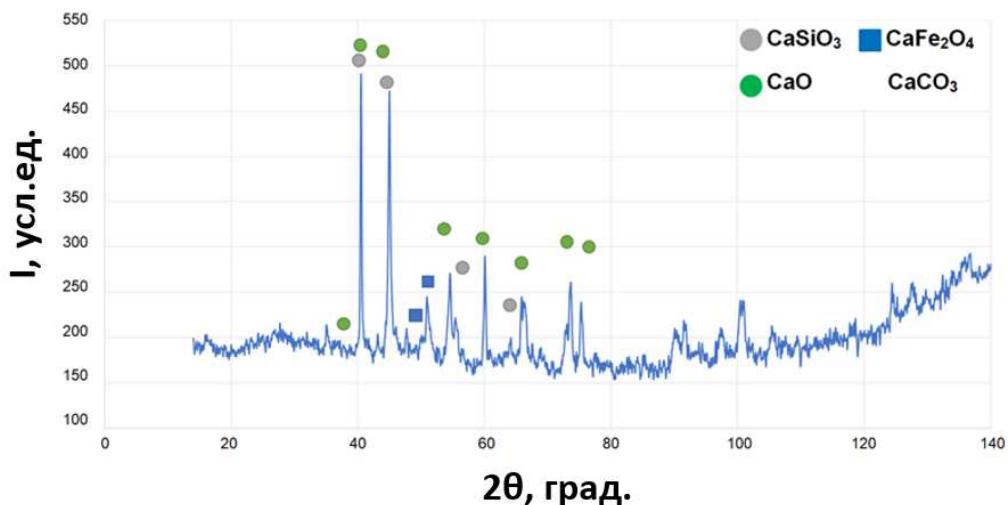


Рис. 2. Рентгенограмма образца конвертерного шлака.

Таким образом, анализ шлака показал, что исследуемый образец представляет собой мелкодисперсный порошок с размером отдельных гранул 1–3 мм, имеющих пористую структуру. В составе гранул, помимо Ca, C и O, содержится Si, Mg, Fe, Mn и S. Ca представлен в виде соединений: CaSiO_3 , CaO , CaFe_2O_4 и CaCO_3 . Следует подчеркнуть, что, несмотря на наличие общих черт, таких как повышенные значения pH и содержание оксидов щелочноземельных металлов, каждый шлак характеризуется индивидуальным элементным составом, обусловленным спецификой производственного процесса на конкретном металлургическом предприятии.

2.2 Результаты лабораторного эксперимента

В ходе исследования не выявлено существенного влияния шлака металлургического производства на всхожесть и морфометрические показатели проростков пшеницы (рис. 3–4).

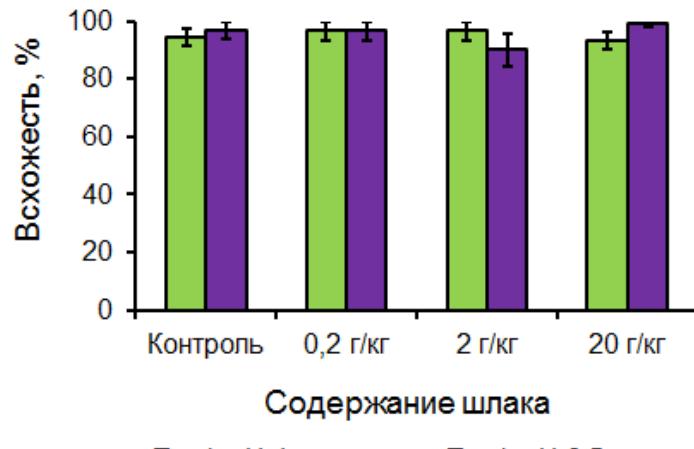


Рис. 3. Всхожесть пшеницы яровой под действием шлака.

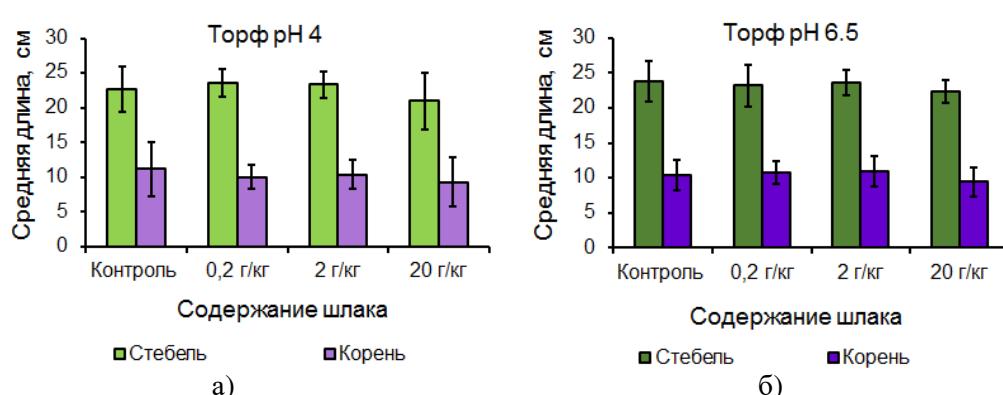


Рис. 4. Влияние шлака на морфометрические показатели проростков пшеницы:
а) в условиях закисленного субстрата; б) в нейтральном субстрате.

Анализ накопления сырой массы пшеницы показал уменьшение показателя массы корня под действием шлака в условиях закисленного грунта (рис. 5 а). Максимальное подавление отмечено в группе, культивируемой при 20 г/кг шлака в субстрате – средняя масса корня уменьшилась в 2 раза. Возможно, данный эффект связан с высокими концентрациями используемых отходов и короткими сроками проведения опыта.

В условиях нейтрального грунта наблюдалось положительное влияние шлака в максимальной дозе (рис. 5 б). В этом варианте средняя масса стеблей увеличилась на 25 % по сравнению с контролем. Однако дальнейший анализ массы высушенных проростков показал, что зафиксированная разница в массе опытных и контрольных растений, вероятно, связана с особенностями накопления влаги в тканях под действием шлака, т.к. масса сухих растений в исследуемых вариантах достоверно не отличалась от массы контрольных (рис. 5 в, г).

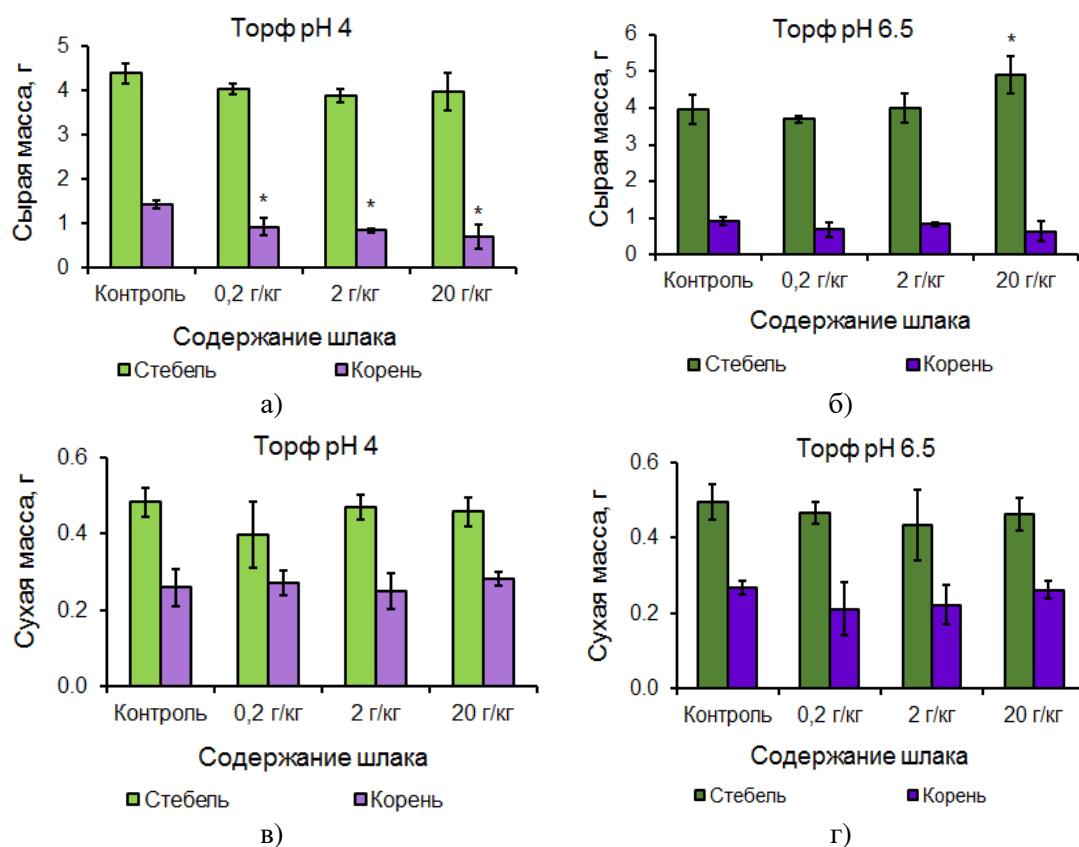


Рис. 5. Масса проростков пшеницы в закисленном грунте: а) сырая масса проростков в закисленном грунте; б) сырая масса проростков в нейтральном грунте; в) сухая масса в закисленном грунте; г) сухая масса проростков в нейтральном грунте.

В ходе оценки воздействия шлака на прирост массы установлено, что анализируемый отход оказывает влияние на накопление влаги растениями, т.к. в большинстве случаев подавление или рост показателей у сырых растений нивелируется после их высушивания. Кроме того, на данном этапе исследования подтверждено разнонаправленное действие шлака, зависимое от кислотности субстрата.

Так, для пшеницы отмечено снижение сырой массы корней при всех дозах шлака в закисленном грунте, минимальные показатели были в группе 20 г/кг. В то же время, при культивировании растений в нейтральном грунте, в варианте 20 г/кг наблюдался прирост массы стебля. После сушки растений не отмечено достоверного влияния шлака на анализируемые показатели.

2.3 Результаты полевого эксперимента

2.3.1 Результаты фенологических наблюдений и оценки всхожести

В ходе проведения полевых опытов проводилась фиксация наступления фаз развития у тест-объекта пшеницы, включая появление всходов. Анализ фенотипических признаков пшеницы, выращенной с использованием различных мелиорантов, не выявил статистически значимых различий в сроках прохождения фаз развития. Появление всходов регистрировалось в интервале между 7-м и 8-м днями эксперимента. Фаза кущения наступала на 21-е сутки во всех опытных вариантах, а колошение – на 51-е. Полная спелость зерна была зафиксирована на 83-и сутки во всех вариантах эксперимента.

2.3.2 Результаты оценки урожайности

Одной из причин, ограничивающей рост урожайности сельскохозяйственных культур в условиях Северо-Запада РФ является кислотность пахотного слоя, чаще всего среднего значения и слабокислого уровня (pH_{KCl} от 4.6 до 5.5). Это обусловлено сложившимся в регионе климатом и почвообразовательным процессом, в основе которого находится преобладание подзолообразования над дерновым процессом. Так как характерен промывной тип водного режима, гидротермический коэффициент больше 1.0.

Высокая урожайность пшеницы была достигнута как на слабокислых, так и на среднекислых почвах (табл. 2).

Применение минерального удобрения $N_{12}P_{16}K_{16}$ обусловило увеличение урожайности яровой пшеницы на 13.9 % в контролльном варианте (без известковых материалов), на 14.3 % при использовании шлака в качестве фона и на 18.9 % при использовании извести. Внесение полных расчётных доз удобрений (варианты 3 и 4) значительно повышало урожайность пшеницы, независимо от наличия известкового материала. Наиболее высокие показатели урожайности были зафиксированы при использовании шлака в качестве фонового материала. Применение удобрения $N_{12}P_{16}K_{16}$ на фоне различных известковых материалов обеспечило достоверную прибавку урожая по сравнению с контролем (без удобрений). Существенных различий между вариантами с использованием полных расчётных доз удобрений и разными фоновыми материалами не наблюдалось. Максимальная прибавка урожая на всех фонах была достигнута в варианте 3 (удобрение без повышения дозы N) по сравнению с внесением удобрений без фона. Внесение повышенной дозы азотного удобрения (вариант 4) показало преимущество только при использовании шлака.

Подводя итоги исследования, нами было обнаружено увеличение урожайности пшеницы, что может быть связано с обеспечением растений микроэлементами. При

этом внесение полных расчётных доз удобрений на фоне шлака существенно повышали показатели урожайности в среднем на 50 %. Можно сказать, что использование удобрений N, P, K совместно со шлаком может стать эффективным агрохимическим приёмом при культивировании пшеницы.

Таблица 2
Урожайность пшеницы яровой

Варианты опыта	$\text{pH}_{\text{KCl}} = 5.4$	$\text{pH}_{\text{KCl}} = 4.8-4.9$
Без известкового фона		
1. Контроль (без удобрений)	1. Контроль (без удобрений)	1. Контроль (без удобрений)
2. $\text{N}_{12}\text{P}_{16}\text{K}_{16}$	2. $\text{N}_{12}\text{P}_{16}\text{K}_{16}$	2. $\text{N}_{12}\text{P}_{16}\text{K}_{16}$
3. $\text{N}_{90}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	3. $\text{N}_{90}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	3. $\text{N}_{90}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$
4. $\text{N}_{130}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	4. $\text{N}_{130}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	4. $\text{N}_{130}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$
На фоне шлака		
1. Контроль (без удобрений)	1. Контроль (без удобрений)	1. Контроль (без удобрений)
2. $\text{N}_{12}\text{P}_{16}\text{K}_{16}$	2. $\text{N}_{12}\text{P}_{16}\text{K}_{16}$	2. $\text{N}_{12}\text{P}_{16}\text{K}_{16}$
3. $\text{N}_{90}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	3. $\text{N}_{90}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	3. $\text{N}_{90}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$
4. $\text{N}_{130}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	4. $\text{N}_{130}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	4. $\text{N}_{130}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$
На фоне извести		
1. Контроль (без удобрений)	1. Контроль (без удобрений)	1. Контроль (без удобрений)
2. $\text{N}_{12}\text{P}_{16}\text{K}_{16}$	2. $\text{N}_{12}\text{P}_{16}\text{K}_{16}$	2. $\text{N}_{12}\text{P}_{16}\text{K}_{16}$
3. $\text{N}_{90}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	3. $\text{N}_{90}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	3. $\text{N}_{90}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$
4. $\text{N}_{130}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	4. $\text{N}_{130}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	4. $\text{N}_{130}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$

2.3.3 Результаты анализа качества урожая

Оценка качества урожая культур, выращенных с применением металлургического шлака, осуществлялась по содержанию в растениях N, P и K.

Результаты оценки качества урожая пшеницы представлены в табл. 3. Установлено, что внесение шлака не сказывалось на количестве N и P, в то время как известняк увеличивала их содержание на 40 и 64 %, соответственно. Содержание K увеличивалось в группе со шлаком в среднем на 16 %, известняк не оказала влияния на данный показатель. Внесение удобрения в данном случае нивелировало различия. Увеличение содержания K в составе зерна культуры под действием шлака возможно связано с присутствием Ca в составе отхода. Содержание Ca в зерне пшеницы увеличивалось после обработки почвы шлаком без удобрений более чем в 4 раза, что говорит о большей доступности Ca в составе шлака по сравнению с известняком.

В условиях более кислой почвы количество N и P также увеличивалось под влиянием шлака без удобрений – на 13 и 64 %, соответственно. Известь несколько меньше стимулировала накопление P и существенно снижала количество N в среднем на 46 % независимо от содержания удобрений.

Таблица 3

Химический состав зерна пшеницы яровой, % сухой массы

Варианты опыта	рН _{KCl} = 5.4			рН _{KCl} = 4.8-4.9		
	N	P	K	N	P	K
Без известкового фона						
Контроль	2.91	0.11	0.43	3.01	0.16	0.42
Удобрения: N _n P _n K _n	2.92	0.11	0.53	2.99	0.11	0.42
На фоне шлака						
Контроль	2.82	0.10	0.50	3.37	0.45	0.42
Удобрения: N _n P _n K _n	2.92	0.11	0.53	2.82	0.40	0.43
На фоне извести						
Контроль	4.05	0.18	0.41	2.02	0.33	0.40
Удобрения: N _n P _n K _n	3.02	0.2	0.51	2.02	0.34	0.41

2.3.4 Влияние удобрений на различных фонах мелиорантов на агрохимические показатели почвы

Отсутствие внесения удобрений и известковых материалов в слабокислую почву привело к тому, что в течение вегетационного периода культур в пахотном слое (0–20 см) произошло незначительное снижение показателей обменной и гидролитической кислотности, горизонт A_n (табл. 4).

В первом и во втором варианте (N₉₀P₄₀K₁₀₀; N₁₃₀P₄₀K₁₀₀) показатели кислотности изменились незначительно под действием извести, а шлак имел преимущество перед другими известковыми материалами.

Без удобрений и без известкования среднекислой почвы за период вегетации культур незначительно снизилась обменная и увеличилась гидролитическая кислотность в пахотном слое почвы 0–20 см, горизонт A_n (табл. 5).

В случае среднекислой почвы (N₉₀P₄₀K₁₀₀; N₁₃₀P₄₀K₁₀₀) под действием шлака и извести в пахотном слое почвы (0–20 см) за период вегетации уменьшилась обменная кислотность на 0.3–2.0 ед. pH и снизилась гидролитическая кислотность на 1.63–1.11 ммоль/100 г почвы. Это можно объяснить нейтрализацией почвенного раствора, вытеснением Ca и Mg из почвенного поглощающего комплекса ионов H, Al и пр. Анализ содержания гумуса в слое 0–20 см к концу вегетационного периода выявил его увеличение на 0.17–0.63 % относительно весенних значений, что было особенно заметно при использовании полных расчётных минеральных систем удобрения в сочетании с мелиорантами. Наиболее существенный прирост гумуса зафиксирован при комбинированном внесении минеральных и органических удобрений: 0.53 % в варианте без известкования и 0.63 % при использовании шлака. Сумма поглощенных оснований увеличилась на фоне с мелиорантами значительно, на 13–38 %. Существенных различий по влиянию на данный показатель между шлаком и известью не выявлено. В контрольном варианте (без удобрений) отмечено

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ КОНВЕРТЕРНОГО ШЛАКА ...

незначительное снижение содержания подвижного фосфора (Р) в пахотном слое, достигающее 6–10 мг/кг почвы. Применение минимальных доз удобрений не оказалось существенного влияния на содержание подвижного Р на всех изучаемых фонах, разница с весенними показателями не превышала ± 1 –4 мг/кг почвы. Внесение расчётных доз удобрений ($N_{90}P_{40}K_{100}$; $N_{130}P_{40}K_{100}$) сопровождалось небольшим увеличением концентрации этого элемента в пахотном слое на 12–38 мг/кг почвы, независимо от фона. В то же время, возделывание культур севооборота без применения удобрений привело к уменьшению содержания подвижного Р на 12–15 мг/кг почвы на всех изучаемых фонах. Использование минимальных доз калийных удобрений ($N_{16}P_{16}K_{16}$) не вызвало заметного снижения содержания обменного калия (К) в пахотном слое; колебания концентрации находились в пределах ± 1 –3 мг/кг почвы. В опыте не наблюдалось значительных изменений без внесения известкового материала после вегетации культур по содержанию Са и Mg по сравнению с исходными данными. Увеличилось содержание данных элементов при внесении мелиорантов. Причем, на 0.8–1.3 ммоль/100 г почвы – Са. А Mg – только при внесении шлака и извести, соответственно на 8–16 % и 11–19 %.

Таблица 4

Агрохимические показатели дерново-подзолистой почвы при применении различных удобрений после уборки урожая культуры ($pH_{KCl} = 5.4$)

Варианты опыта	pH_{KCl}	Гумус, %	H_+ , ммоль(мг – экв.) / 100г почвы	S, ммоль(мг – экв.) / 100г почвы	Подвижный P_2O_5 , мг/кг	Обменный K_2O , мг/кг	Ca, ммоль/100г	Mg, ммоль/100г
0*	5.4	2.4	2.62	4.8	310	133	3.0	2.4
Контроль (без удобрений)	5.6	1.9	1.86	4.2	222	63	5.0	0.1
$N_{16}P_{16}K_{16}$	5.3	2.1	2.35	6.6	293	102	4.3	0.1
$N_{90}P_{40}K_{100}; N_{130}P_{40}K_{100}$	5.9	2.3	1.60	7.8	298	110	4.4	3.6
Контроль (без удобрений)	5.5	2.0	1.94	6.0	313	85	3.5	1.5
$N_{16}P_{16}K_{16}$	5.7	2.4	1.74	3.8	380	113	3.8	2.3
$N_{90}P_{40}K_{100}; N_{130}P_{40}K_{100}$	6.9	2.8	0.56	10.2	355	83	7.0	0.1
Контроль (без удобрений)	6.4	2.2	0.67	8.6	368	100	5.0	3.0
$N_{16}P_{16}K_{16}$	5.5	2.1	1.98	4.6	383	73	3.5	2.5
$N_{90}P_{40}K_{100}; N_{130}P_{40}K_{100}$	7.2	2.8	0.43	10.8	236	126	1.8	0.1

Примечание: здесь и далее 0* – данные перед закладкой опыта.

Таблица 5
Агрохимические показатели дерново-подзолистой почвы при применении различных удобрений после уборки урожая культуры ($\text{pH}_{\text{KCl}} = 4.8\text{-}4.9$)

Варианты опыта	pH_{KCl}	Гумус, %	H_2O , ммоль (мг – экв.) / 100г почвы	S , ммоль (мг – экв.) / 100г почвы	Подвижный P_2O_5 , мг/кг	Обменный K_2O , мг/кг	Ca , ммоль/100г	Mg , ммоль/100г
0*	4.8	2.56	3.65	5.6	132	55	4.0	1.3
Контроль (без удобрений)	4.9	3.8	3.26	7.0	186	55	4.3	1.3
$\text{N}_{16}\text{P}_{16}\text{K}_{16}$; $\text{N}_{90}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$; $\text{N}_{130}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	4.9	4.0	3.71	6.6	258	160	4.8	1.8
Контроль (без удобрений)	4.9	3.1	3.13	6.0	125	64	4.3	3.3
$\text{N}_{16}\text{P}_{16}\text{K}_{16}$	5.1	3.6	3.13	5.2	257	98	3.8	1.0
$\text{N}_{90}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$; $\text{N}_{130}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	5.4	4.4	2.80	7.2	222	105	5.8	1.3
Контроль (без удобрений)	4.8	5.1	4.23	8.6	210	174	5.8	0.75
$\text{N}_{16}\text{P}_{16}\text{K}_{16}$; $\text{N}_{90}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$; $\text{N}_{130}\text{P}_{40}\text{K}_{100}$	4.9	5.2	4.82	8.8	252	120	5.5	2.5

Также показатели кислотности улучшились значительно под действием извести и шлака. Значительных различий по оптимизации обменной и снижению гидролитической кислотности между изучаемыми известковыми материалами не выявлено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный физико-химический анализ образцов шлака показал соответствие представленных образцов типичному составу конвертерного шлака, при этом ключевое для данной работы химическое соединение – CaO находится в форме гидроксида, силиката и карбоната.

Экспериментальная оценка всхожести и морфометрических показателей культуры под действием шлака металлургического производства не показала существенного влияния мелиоранта на вышеуказанные показатели. Важным результатом исследования является отсутствие негативного влияния шлака в максимальной концентрации на выбранную культуру независимо от типа субстрата.

При изучении воздействия шлака на прирост массы тест-объекта в контролируемых условиях лабораторного эксперимента было установлено, что анализируемый шлак оказывает влияние на накопление влаги пшеницей, т.к. в большинстве случаев подавление или рост показателей у сырых растений нивелируется после их высушивания. Кроме того, на данном этапе исследования подтверждено разнонаправленное действие шлака, зависимое от кислотности

субстрата. Следует отметить, что добавка шлака в высокой норме внесения повышает pH модельного грунта на 1–1.5 ед.

Проведенные эксперименты в условиях полевого опыта показали, что внесение в почву конвертерного шлака не оказало влияния на наступление фаз развития пшеницы. Полевая всхожесть культуры и вариантов опытных посевов была высокой и составила до 83–84 %. На неё значительное влияние оказали благоприятные агроклиматические условия: влажность и температура почвы, так как после посева культур выпало достаточное количество осадков, при этом температура почвы на глубине посева семян имела оптимальные значения.

При внесении шлака в почву урожайность культуры пшеницы повышалась на 14 % в слабокислой почве и на 16 % в среднекислой, тогда как на фоне извести показатель увеличивался на 12 % в слабокислой среде и на 13 % в среднекислой. Добавление N, P и K в соотношении $N_{12}P_{16}K_{16}$ увеличило прирост урожайности как с мелиорантами, так и без них. Так, показатели увеличились на 13.9 % без фона известкового материала, на 14.3 % на фоне шлака, на 18.9 % на фоне извести. Максимальные показатели урожайности наблюдались на фоне шлака. Все фоновые материалы обеспечили прибавку зерна при применении $N_{12}P_{16}K_{16}$ по сравнению с контролем. Наибольшую прибавку на всех фонах обеспечил вариант удобрения $N_{90}P_{40}K_{100}$ по сравнению с внесением удобрений без фона. Внесение повышенной дозы азотного удобрения $N_{130}P_{40}K_{100}$ имело преимущество на фоне шлака.

Подводя итоги исследования, можно сказать, что использование удобрений N, P, K совместно со шлаком может стать эффективным агрохимическим приёмом при культивировании пшеницы в условиях слабокислых и среднекислых почв.

Анализ качества урожая культуры, выращенной в условиях слабокислой почвы, показал разнонаправленное действие шлака. Внесение отхода не сказывалось на количестве N и P в зерне пшеницы, в то время как известь увеличивала их содержание на 40 и 64 %, соответственно. Содержание K увеличивалось в группах со шлаком в среднем на 16 %, при этом известь не оказала влияния на данный показатель.

Повышение кислотности почвы значительно изменило результаты эксперимента. Так, в отличие от слабокислой почвы, количество N и P в зерне пшеницы увеличивалось под влиянием шлака в почве без удобрений – на 13 и 181 %, соответственно. Известь, несколько меньше стимулируя накопление P, существенно снижала содержание N – в среднем на 46 % независимо от содержания удобрений.

Для выявления динамики изменения агрохимических показателей, в том числе микроэлементов, необходимо дальнейшее проведение опытов, так как на почвообразовательный процесс существенное влияние оказывает погода. Кроме того, необходимо отметить, что метеорологические условия вегетационного периода, отмеченные на время проведения эксперимента, отклонялись от средних многолетних значений. В первую половину вегетации отмечался дефицит влаги, во вторую количество выпавших осадков превысило норму.

На делянках с внесением мелиорантов отмечен незначительный рост содержания подвижных форм микроэлементов в пахотном горизонте почвы.

В целом, результаты данного исследования показали, что применение исследованного конвертерного шлака в сельскохозяйственном производстве в качестве почвенного мелиоранта имеет многообещающий потенциал для использования данного отхода в качестве раскислителя и недорогого источника необходимых растению микроэлементов. В тоже время, требуется проведение дальнейших исследований с различными культурами для изучения экологического воздействия применения данного материала в почву.

Исследование выполнено при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMG-2024-0018, Рег. № 1024042300021-5-2.4.2;4.1.1).

Список литературы

1. Brandaleze E. Treatments and recycling of metallurgical slags / E. Brandaleze, E. Benavidez, L. Santini // Recovery and Utilization of Metallurgical Solid Waste. – 2018. – P. 35–52.
2. Gopinath S. Carbon dioxide sequestration using steel slag—modeling and experimental investigation / S. Gopinath, A. Mehra // Carbon dioxide sequestration in cementitious construction materials. – Woodhead Publishing, 2018. – P. 65–80.
3. Windt De L. Kinetics of steel slag leaching: Batch tests and modeling / L. De Windt, P. Chaurand, J. Rose // Waste Management. – 2011. – Vol. 31. – No 2.
4. Shi C. Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties / C. Shi // Journal of materials in civil engineering. – 2004. – T. 16, No. 3. – P. 230–236.
5. Yang J. W. Influence of steel slag on the workability of concrete / J. W. Yang, Q. Wang, P. Y. Yan [et al.] // Key Engineering Materials. – 2013. – T. 539. – P. 235–238.
6. Lee J. Y. Comparing properties of concrete containing electric arc furnace slag and granulated blast furnace slag / J. Y. Lee, J. S Choi, T. F. Yuan [et al.] // Materials. – 2019. – Vol. 12, No 9. – 1371 p.
7. Piemonti A. Use of iron and steel slags in concrete: state of the art and future perspectives / A. Piemonte, A. Conforti, L. Cominoli [et al.] // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, No 2. – 556 p.
8. Siddiqui A. R. Iron and steel slag: an alternative source of raw materials for porcelain ceramics / A. R. Siddiqui, M. Pal, D. Bhattacharya [et al.] // Global NEST Journal. – 2014. – Vol. 16, No 4. – P. 587–596.
9. Karamanova E. Ceramics from blast furnace slag, kaolin and quartz / E. Karamanova, G. Avdeev, A. Karamanov // Journal of the european ceramic society. – 2011. – Vol. 31, No 6. – P. 989–998.
10. Krayushkina K. Use of steel slags in automobile road construction / K. Krayushkina, O. Prentkovskis, A. Bieliatynskyi, [et al.] // Transport. – 2012. – Vol. 27, No 2. – P. 129–137.
11. Kozhukhova N. Reasonability of application of slags from metallurgy industry in road construction / N. Kozhukhova, N. Kadyshev, A. Cherevatova [et al.] // Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. – Cham: Springer International Publishing. – 2017. – P. 776–782.
12. Rai A. Metallurgical slag as a component in blended cement / A. Rai, J. Prabakar, C. B. Raju [et al.] // Construction and Building Materials. – 2002. – Vol. 16, No 8. – P. 489–494.
13. Jiang Y. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete — A review / Y. Jiang, T. C. Ling, C. Shi [et al.] // Resources, Conservation and Recycling. – 2018. – Vol. 136. – P. 187–197.
14. De Almeida Bertani R. M. The comprehensive utilization of steel slag in agricultural soils / R. M. de Almeida Bertani, L. L. Q. Moreira, L.T. Büll [et al.] // Recovery and utilization of metallurgical solid waste. – 2019. – 53 p.
15. White B. Effect of silicate slag application on wheat grown under two nitrogen rates / B. White, B. S. Tubana, T. Babu [et al.] // Plants. – 2017. – Vol. 6, No 4. – 47 p.
16. Gwon H. S. Environmental risk assessment of steel-making slags and the potential use of LD slag in mitigating methane emissions and the grain arsenic level in rice (*Oryza sativa* L.) / H. S. Gwon, M. I. Khan, M. A. Alam [et al.] // Journal of hazardous materials. – 2018. – Vol. 353. – P. 236–243.

17. Ning D. Impacts of steel-slag-based silicate fertilizer on soil acidity and silicon availability and metals-immobilization in a paddy soil / D. Ning, Y. Liang, Z. Liu [et al.] // PLoS One. – 2016. – Т. 11, №. 12. – e0168163 p.
18. Das S. Cropping with slag to address soil, environment, and food security / S. Das, G. W. Kim, H. Y. Hwang [et al.] // Frontiers in Microbiology. – 2019. – Vol. 10. – 1320 p.
19. Radic S. Effect of electric arc furnace slag on growth and physiology of maize (*Zea mays* L.) / S. Radic, H. Crnojevic, D. Sandev [et al.] // Acta biologica hungarica. – 2013. – Vol. 64. – P. 490–499.
20. Pistocchi C. Exchangeable sodium percentage decrease in saline sodic soil after basic oxygen furnace slag application in a lysimeter trial / C. Pistocchi, G. Ragaglini, V. Colla [et al.] // Journal of Environmental Management. – 2017. – Vol. 203. – P. 896–906.
21. Ali M. T. Converter slag as a liming agent in the amelioration of acidic soils / M. T Ali, S. H Shahram // International Journal of Agriculture and Biology. – 2007. – Vol. 9, № 5. – 715 p.
22. Ning D. Effects of slag-based silicon fertilizer on rice growth and brown-spot resistance / D. Ning, A. Song, F. Fan // Plos one. – 2014. – Vol. 9, № 7. – e102681 p.
23. Barbosa Filho M. P. Influence of calcium silicate slag on soil acidity and upland rice grain yield / M. P. Barbosa Filho, F. J. P. Zimmermann, O. F. D. Silva // Ciencia e Agrotecnologia. – 2004. – Vol. 28. – P. 323–331.
24. He H. Effects of steel slag amendments on accumulation of cadmium and arsenic by rice (*Oryza sativa*) in a historically contaminated paddy field / H. He, Q. Xiao, M. Yuan [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – Vol. 27, №. 32. – P. 40001–40008.
25. Radic S. Effect of electric arc furnace slag on growth and physiology of maize (*Zea mays* L.) / S. Radic, H. Crnojevic, D. Sandev [et al.] // Acta biologica hungarica. – 2013. – Vol. 64, №. 4. – P. 490–499.
26. Tavakkoli E. Interaction of silicon and phosphorus mitigate manganese toxicity in rice in a highly weathered soil / E. Tavakkoli, P. English, C. N. Guppy // Communications in Soil Science and Plant Analysis. – 2011. – Vol. 42, №. 5. – P. 503–513.
27. Liang Y. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review / Y. Liang, W. Sun, Y. G. Zhu [et al.] // Environmental pollution. – 2007. – Vol. 147, №. 2. – P. 422–428.
28. Ng C. W. W. Effects of ground granulated blast-furnace slag (GGBS) on hydrological responses of Cd-contaminated soil planted with a herbal medicinal plant (*Pinellia ternata*) / C. W. W. Ng, N. Chowdhury, J. T. F. Wong // Canadian Geotechnical Journal. – 2020. – Vol. 57, № 5. – P. 673–682.
29. Беланов И. П. Фитотоксичность почвосубстратов на основе шлаков металлургического производства, используемых в рекультивации / И. П. Беланов, О. А. Савенков, Н.Б. Наумова // Почвы и окружающая среда. – 2018. – Т. 1, вып. 2. – С. 67–79.
30. Беланов И. П. Шлаки металлургического производства–перспективный материал для рекультивации техногенных отходов / И. П. Беланов, Н. Б. Наумова, И. С. Семина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2019. – Т. 61, вып. 12. – С. 987–992.
31. Бодяков А. Н. Актуальные проблемы металлургических шлаков / А. Н. Бодяков, Д. В. Бугряшов // Образование. Наука. Производство: XIII Международный молодежный форум, Белгород, 08–09 октября 2021 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2021. – С. 1016–1020.
32. Чухина О. В. Изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой почвы при применении удобрений / О. В. Чухина //Агрохимический вестник. – 2013. – вып. 3. – С. 011–014.
33. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта: с основами статистической обработки результатов исследований / Б. А. Доспехов. – 5-е изд., доп. и перераб. – Москва: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
34. Хомяков Д. М. Оптимизация системы удобрений и агрометеорологические условия / Д. М. Хомяков – М.: Изд-во МГУ. – 1991. – 83 с.
35. Чухина О. В. Сорта основных полевых культур, многолетних трав, допущенные к использованию в Северо-Западном регионе и районированные в Вологодской области: Учебно-методическое пособие / О. В. Чухина, А. И. Демидова. – Вологда-Молочное: Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н. В. Верещагина, 2018. – 111 с.
36. Branca T. A. Possible uses of steelmaking slag in agriculture: an overview / T. A. Branca, V. Colla // Material recycling–Trends and perspectives. – 2012. – P. 335–356

ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY OF CONVERTER SLAG OF PJSC «SEVERSTAL» AS A SOIL RECLAMATION AGENTS

**Baranchikov P. A.¹, Chebotaryova S. P.¹, Zakharova O. V.^{1,2}, Koiava E. Yu.¹,
Gusev A. A.^{1,3}**

¹*Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia*

²*Engineering Center, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia*

³*National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia*

E-mail: sweta-chebotarjova@yandex.ru

The purpose of this study is to study the effect of converter slag on spring wheat both in laboratory and field conditions. The slag sample used in the study was a fine powder consisting of granules up to 1.5 mm in size. Microscopic analysis revealed that the granules had the shape of irregular polyhedrons, as well as a porous structure. Elemental analysis showed that in addition to Ca, C, O, the slag contains Si in a concentration of 2–4 % of the total mass, Mg – 1.5–3 %, Al – 1.5–2 % and Fe – 1.5–3 %. In addition, Mn and S were found in small quantities. X-ray diffraction analysis showed that calcium is mainly present in the form of silicates, ferrites and oxides, as well as in the form of calcium carbonate. In a laboratory experiment, when studying the effect of metallurgical waste on the germination and morphometric parameters of the selected crop, no significant changes were found. At the same time, the analysis of the accumulation of raw mass showed that in acidified soil conditions, slag negatively affects the mass of roots. The most pronounced suppression of the root system was observed when introducing the maximum concentration of slag (20 g / kg) into the substrate, where the average root mass decreased by 2 times. The opposite effect was recorded under conditions where the acidity of the substrate was neutral. The average stem mass increased by 25 % compared to the control samples. When analyzing dried sprouts in both types of substrate, no reliable differences were found compared to the control options.

In the conditions of a field experiment, when analyzing the phenotypic characteristics of plants grown using various ameliorative additives, including converter slag, no significant differences in the rate of developmental stages were found. In the conditions of the North-West of the Russian Federation, where the acidity of the arable layer reaches pH 4.6–5.5, the use of $N_{12}P_{16}K_{16}$ fertilizer in combination with converter slag increases the yield of spring wheat by 14.3 %, which is comparable to the effect of using lime (18.9 %) and exceeds the effect of using only fertilizer (13.9 %), demonstrating the potential of slag as an effective agrochemical agent.

The quality of the yield of crops grown using metallurgical slag was assessed based on the content of N, P and K in plants. The use of metallurgical slag increases the potassium content in wheat by 16 %, and calcium by more than 4 times. This is especially effective on acidic soils, where the content of nitrogen (by 13 %) and phosphorus (by 64 %) also increases, while lime has a less effective effect on the content of nitrogen and phosphorus, reducing the nitrogen content by 46 % on acidic soils. When analyzing the agrochemical parameters of the soil, it was found that in slightly acidic soil, in the absence of fertilizers and liming, there is a slight decrease in acidity in the 0–20 cm layer. When fertilizers are applied ($N_{90}P_{40}K_{100}$ and $N_{13}0P_{40}K_{100}$), slag demonstrates a more pronounced decrease in acidity compared to lime. High wheat yields were recorded in both slightly acidic and

moderately acidic soils. The use of mineral fertilizer $N_{12}P_{16}K_{16}$ led to an increase in yield by 1.9 % in the control variant (without lime fertilizers), by 14.3 % when using converter slag as a background material, and by 18.9 % when using lime. The application of full calculated doses of fertilizers $N_{90}P_{40}K_{100}$ and $N_{130}P_{40}K_{100}$ significantly increased the wheat yield regardless of the presence of lime material. The highest yields were recorded when using slag as a background material. In moderately acidic soil during the growing season the following is observed: a decrease in exchangeable acidity by 0.3–2.0 pH units and a decrease in hydrolytic acidity by 1.63–1.11 mmol/100 g when adding slag and lime with fertilizers ($N_{90}P_{40}K_{100}$; $N_{130}P_{40}K_{100}$); an increase in humus content by 0.17–0.63 %, especially when adding mineral and organic fertilizers (maximum 0.63 % with slag); an increase in the sum of absorbed bases by 13–38 %; an increase in Ca content by 0.8–1.3 mmol/100 g; an increase in Mg by 8–16 % (slag) and 11–19 % (lime). The content of mobile phosphorus increased by 12–38 mg/kg when applying the calculated doses of fertilizers, while cultivation without fertilizers led to a decrease of 12–15 mg/kg.

The obtained results show the prospects of using converter slag as an effective component of agricultural technologies. It has been proven that the use of this metallurgical waste contributes to the improvement of the physical and chemical properties of the soil, optimization of the balance of nutrients and, as a result, an increase in the yield of agricultural crops.

Keywords: converter slag, ameliorants, soil deoxidation, spring wheat.

References

1. Brandaleze E., Benavidez E., Santini L. Treatments and recycling of metallurgical slags. *Recovery and Utilization of Metallurgical Solid Waste*, 35 (2018).
2. Gopinath S., Mehra A. Carbon dioxide sequestration using steel slag—modeling and experimental investigation. In *Carbon dioxide sequestration in cementitious construction materials* (pp. 65-80). Woodhead Publishing (2018).
3. Chaurand P., Rose J. Kinetics of steel slag leaching: Batch tests and modeling. *Waste Management*, **31**(2) (2011).
4. Shi, C. Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of materials in civil engineering*, **16**(3), 230 (2004).
5. Yang J. W., Wang Q., Yan P. Y., Zhang B. Influence of steel slag on the workability of concrete. *Key engineering materials*, **539**, 235 (2013).
6. Lee J. Y., Choi J. S., Yuan T. F., Yoon Y. S., Mitchell, D. Comparing properties of concrete containing electric arc furnace slag and granulated blast furnace slag. *Materials*, **12**(9), 1371 (2019).
7. Piemonti A., Conforti A., Cominoli L., Sorlini S., Luciano A., Plizzari, G. Use of iron and steel slags in concrete: state of the art and future perspectives. *Sustainability*, **13**(2), 556 (2021).
8. Siddiqui A. R., Pal M., Bhattacharya D., Das, S. K. Iron and steel slag: an alternative source of raw materials for porcelain ceramics. *Global NEST Journal*, **16**(4), 587 (2014).
9. Karamanova E., Avdeev G., Karamanov A. Ceramics from blast furnace slag, kaolin and quartz. *Journal of the european ceramic society*, **31**(6), 989 (2011).
10. Krayushkina K., Prentkovskis O., Bieliatynskyi A., Junevičius R. Use of steel slags in automobile road construction. *Transport*, **27**(2), 129 (2012).
11. Kozhukhova N., Kadyshev N., Cherevatova A., Voitovich E., Lushin K. Reasonability of application of slags from metallurgy industry in road construction. In *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport* (pp. 776-782). Cham: Springer International Publishing (2017).
12. Rai A., Prabakar J., Raju C. B., Morschalle R. K. Metallurgical slag as a component in blended cement. *Construction and Building Materials*, **16**(8), 489 (2002).

13. Jiang Y., Ling T. C., Shi C., Pan S. Y. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, **136**, 187 (2018).
14. de Almeida Bertani R. M., Moreira L. L. Q., Büll L. T. The comprehensive utilization of steel slag in agricultural soils. *Recovery and utilization of metallurgical solid waste*, 53 (2019).
15. White B., Tubana B. S., Babu T., Mascagni Jr, H., Agostinho F., Datnoff L. E., Harrison S. Effect of silicate slag application on wheat grown under two nitrogen rates. *Plants*, **6**(4), 47 (2017).
16. Gwon H. S., Khan M. I., Alam M. A., Das S., Kim P. J. Environmental risk assessment of steel-making slags and the potential use of LD slag in mitigating methane emissions and the grain arsenic level in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of hazardous materials*, **353**, 236 (2018).
17. Ning D., Liang Y., Liu Z., Xiao J., Duan A. Impacts of steel-slag-based silicate fertilizer on soil acidity and silicon availability and metals-immobilization in a paddy soil. *PLoS One*, **11**(12), e0168163 (2016).
18. Das S., Kim G. W., Hwang H. Y., Verma P. P., Kim P. J. Cropping with slag to address soil, environment, and food security. *Frontiers in Microbiology*, **10**, 1320 (2019).
19. Radić S., Crnojević H., Sandev D., Jelić S., Sedlar Z., Glavaš K., Pevalek-Kozlina B. Effect of electric arc furnace slag on growth and physiology of maize (*Zea mays* L.). *Acta biologica hungarica*, **64**, 490 (2013).
20. Pistocchi C., Ragaglini G., Colla V., Branca T. A., Tozzini C., Romaniello L. Exchangeable sodium percentage decrease in saline sodic soil after basic oxygen furnace slag application in a lysimeter trial. *Journal of Environmental Management*, **203**, 896 (2017).
21. Torkashvand M. A. Converter slag as a liming agent in the amelioration of acidic soils. *International Journal of Agriculture Biology*, **9**(5), 715 (2007).
22. Ning D., Song A., Fan F., Li Z., Liang Y. Effects of slag-based silicon fertilizer on rice growth and brown-spot resistance. *Plos one*, **9**(7), e102681 (2014).
23. Barbosa Filho M. P., Zimmermann F. J. P., Silva O. F. D. Influence of calcium silicate slag on soil acidity and upland rice grain yield. *Ciencia e Agrotecnologia*, **28**, 323 (2004).
24. Ning D., Liang Y., Liu Z., Xiao J., Duan A. Impacts of steel-slag-based silicate fertilizer on soil acidity and silicon availability and metals-immobilization in a paddy soil. *PLoS One*, **11**(12), e0168163 (2016).
25. Radić S., Crnojević H., Sandev D., Jelić S., Sedlar Z., Glavaš K., Pevalek-Kozlina B. Effect of electric arc furnace slag on growth and physiology of maize (*Zea mays* L.). *Acta biologica hungarica*, **64**, 490 (2013).
26. Tavakkoli E., English P., Guppy C. N. Interaction of silicon and phosphorus mitigate manganese toxicity in rice in a highly weathered soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **42**(5), 503 (2011).
27. Liang Y., Sun W., Zhu Y. G., Christie P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environmental pollution*, **147**(2), 422 (2007).
28. Ng C. W. W., Chowdhury N., Wong J. T. F. Effects of ground granulated blast-furnace slag (GGBS) on hydrological responses of Cd-contaminated soil planted with a herbal medicinal plant (*Pinellia ternata*). *Canadian Geotechnical Journal*, **57**(5), 673 (2020).
29. Belanov I. P., Savenkov O. A., Naumova N. B. Phytotoxicity of soil substrates based on metallurgical slags used in reclamation. *Soils and Environment*, **1**(2), 67 (2018).
30. Belanov I. P., Naumova N. B., Semina I. S., Savenkov O. A. Metallurgical production slag – a promising material for man-made waste recultivation. News of higher educational institutions. *Ferrous metallurgy*, **61**(12), 987 (2019).
31. Bodyakov A. N., Bugryashov D. V. *Actual problems of metallurgical slags*, Education. Science. Production: XIII International Youth Forum, Belgorod, October 08–09, 2021. – p. 1016-1020 (Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2021).
32. Chukhina O. V. Changes in the agrochemical parameters of soddy-podzolic soil when applying fertilizers. *Agrochemical Bulletin*, **11** (2013).
33. Dospekhov B. A. *Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results)*, (1985).
34. Khomyakov D. M. *Optimization of the fertilizer system and agrometeorological conditions*; Moscow State University Press: Moscow, (1991).
35. Chukhina O. V., Demidova A. I. *Varieties of main field crops, perennial grasses, approved for use in the North-West region and zoned in the Vologda region: teaching aid*; FGBOU Vologda State Medical Academy: Vologda-Molotnoye, (2018).
36. Branca T. A., Colla V. Possible uses of steelmaking slag in agriculture: an overview. *Material recycling—Trends and perspectives*, 335-356 (2012).