

УДК 631.812.1

DOI 10.29039/2413-1725-2023-9-2-29-43

ВЛИЯНИЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА НА РАСТЕНИЯ ЛЬНА-ДОЛГУНЦА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КИСЛОТНОСТИ СРЕДЫ

*Баранчиков П. А.¹, Чеботарева С. П.¹, Захарова О. В.^{1,2,3}, Григорьев Г. В.¹,
Волохов С. В.⁴, Кузнецов Д. В.³, Мишнев П. А.⁴, Адигамов Р. Р.⁴, Гусев А. А.^{1,2,3}*

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

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

³Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

⁴АО «Северсталь менеджмент», Череповец, Вологодская область, Россия

E-mail: petrovi4-98@yandex.ru

Проведена оценка применимости конвертерного шлака в сельскохозяйственном производстве в качестве почвенного мелиоранта при выращивании льна-долгунца на почвах с различной кислотностью. В лабораторном эксперименте анализ морфометрических показателей культуры показал снижение длины корня в среднем на 4 см в варианте 20 г/кг в условиях закисленного грунта. В условиях рН-нейтрального субстрата все концентрации шлака ингибировали прирост стебля. В полевом эксперименте значения урожайности при внесении удобрений на фоне шлака были увеличены в среднем на 0,7 % в условиях слабокислой почвы. В случае среднекислой почвы установлено увеличение (+4 %) урожайности при внесении удобрений $N_{45}P_{45}K_{80}$ и $N_{60}P_{45}K_{80}$ на фоне шлака. Таким образом, показана возможность применения исследованного конвертерного шлака в сельскохозяйственном производстве.

Ключевые слова: конвертерный шлак, мелиоранты, раскисление почв, лен-долгунец.

ВВЕДЕНИЕ

Металлургия является одной из наиболее материало- и энергоемких отраслей промышленности. Высокий расход сырьевых ресурсов обуславливает значительный уровень образования отходов в данной отрасли. Особое значение комплексного использования сырья имеет такая отрасль промышленности, как черная металлургия, где при выплавке чугуна, стали и ферросплавов образуется большое количество технологических отходов. Из них 80 % приходится на шлаки, которые образуются из пустой породы железорудных материалов, флюсов, золы топлива, а также продуктов окисления металлов и примесей [1]. Переработка техногенных отходов может стать источником большого количества сырья для химической, строительной и металлургической промышленности [2].

При этом, если доменные шлаки благодаря химическому составу, структуре и насыпному весу, успешно используются в качестве инертных материалов в дорожном строительстве, при производстве цемента, то сталеплавильные шлаки

(конвертерные, электродуговые, ковшевые) пока находят незначительное применение. В России ежегодно образуется более 8.0–10.0 млн. т сталеплавильных шлаков, основной способ переработки – это дробление, магнитная сепарация и рассев по фракциям [3]. При этом в повторную переработку уходит только 15–25 % от общей массы, в виде металлургического скрапа, остальное в виде щебней различных фракций уходит в строительную отрасль или накапливается в отвалах. Поэтому в настоящее время актуален вопрос о расширении набора методов и технологий, позволяющих увеличить долю вторичного использования шлаковых продуктов с более высокой рентабельностью.

Одним из перспективных направлений переработки шлаковых отходов является сельское хозяйство. Поскольку шлак богат известью (CaO), кремниевой кислотой (SiO₂), фосфорной кислотой (P₂O₅), магнием (MgO), Mn и Fe, эти свойства шлака позволяют использовать его в качестве удобрений [4]. В последние годы ряд исследований показали, что внесение удобрений на основе шлака имеет большие перспективы в агрохимической практике для повышения урожайности сельскохозяйственных культур, снижения эмиссии парниковых газов [5, 6] уменьшения закисления почвы и стабилизации тяжелых металлов в загрязненных почвах [7], что превращает их в продукт с высокой добавленной стоимостью для устойчивого сельского хозяйства. Реализация исследовательского проекта, финансируемого программой Исследовательского фонда угля и стали (RFCS) [8], позволила получить обширные данные о потенциале использования в качестве известкователей и микроудобрений мелкозернистых металлургических шлаков, таких как: доменный шлак, конвертерный шлак и ковшевой шлак по сравнению с другими известковательными материалами, такими как: негашеная известь или карбонатный известняк. Исследования, проведенные в полевых условиях, показали, что урожайность экспериментальных культур в долгосрочных экспериментах с использованием конвертерных шлаков была выше, чем урожайность, полученная после использования различных материалов для известкования, при одинаковом увеличении pH. В работе Такахаси с соавторами [9] продемонстрировано, что удобрение на основе шлака столь же эффективно, как и коммерческие калийные силикатные удобрения и комбинированные калийно-силикатные удобрения. В другом эксперименте установлено, что применение пыли конвертерного производства (содержащая 430 г Fe/kg) в качестве удобрения для щелочных почв, существенно увеличивало выход сухого вещества сорго [10]. В исследовании Wang с соавторами сообщается, что использование сталеплавильного шлака в качестве железосодержащего удобрения позволяет устранить хлороз сельскохозяйственных культур и приводит к увеличению поглощения железа и выхода сухого вещества кукурузы [11]. В целом, результаты многочисленных исследований показывают перспективность использования конвертерного шлака в качестве раскислителя почв, источника Si, P и Fe для растений, а также для связывания тяжелых металлов в почве.

Целью данного исследования было изучение влияния конвертерного шлака на растения льна – долгунца в условиях лабораторного и полевого опыта на субстратах с различной кислотностью. Результаты настоящего эксперимента могут послужить

базисом для формирования потенциальной технологии применения конвертерных шлаков в сельскохозяйственном производстве в качестве почвенных мелиорантов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1.1 Анализ конвертерного шлака

В работе использовался конвертерный шлак ПАО «Северсталь». Микроструктура образца шлака, а также элементный состав образца изучали с помощью методов электронной микроскопии. Исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JEOL NeoScore JCM-7000 (Япония). Элементное распределение осуществлялось методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии. Дополнительно проводились рентгенофазовые и рентгеноструктурные исследования на рентгеновском дифрактометре «Дифрей» (Россия).

1.2 Лабораторный эксперимент

В лабораторном опыте для анализа влияния шлака на культуру льна-долгунца (*Linum usitatissimum* L. (Linaceae)) (сорт Цезарь) были использованы следующие концентрации отхода: 0,2; 2 и 20 г/кг грунта. В качестве основы для культивационных сред использовались два типа торфа – нейтральный (рН 6,5) и кислый (рН 4). Исследования проводились в 3-х кратной повторности. В пластиковые контейнеры (объемом 0,5 л) с культивационным субстратом высаживали по 30 семян. Исследования проводились согласно ГОСТ Р ИСО 22030–2009. В качестве анализируемых показателей выступали: всхожесть, морфометрические параметры проростков (длина стебля, длина корня), сырая и сухая биомасса проростков.

1.3 Полевой эксперимент

Полевые исследования проводились на базе ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина». Почвы опытных делянок дерново-подзолистые со следующими уровнями кислотности – $pH_{KCl} = 5.4$ и $pH_{KCl} = 4.8-4.9$. В работе использовались следующие значения внесения мелиорантов: 2,4 т/га для почв с $pH_{KCl} = 5.4$ и 3 т/га почв с $pH_{KCl} = 4.8-4.9$. Для оценки эффективности шлака по сравнению с общепринятым раскислителем, использовали известь в тех же нормах внесения (с пересчетом на CaO).

Дозы удобрений (N, P, K), применяемые в полевом опыте, рассчитывались на основе научно обоснованных рекомендаций для условий Вологодской области [12].

Опыты проводились в 4-х кратной повторности, расположение делянок – усложнённое систематическое. Полевые исследования сопровождались следующими [12–15] учетами: фенологические наблюдения, проводимые в течение вегетационного периода по методике Б. А. Доспехова, оценка урожая [13]. Содержание N в растительных образцах определяли после мокрого озоления по К. Гинзбург – по Кьельдалю, подвижного P – на фотоколориметре, K – на пламенном фотометре [16].

1.4 Статистическая обработка

Методы описательной статистики включали в себя оценку среднего арифметического (M) и 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

Результаты СЭМ анализа показаны на рис. 1. Как видно из представленных изображений, гранулы шлака имеют пористую структуру, размер пор до 100 мкм. Средний размер отдельных гранул составляет 1–3 мм.

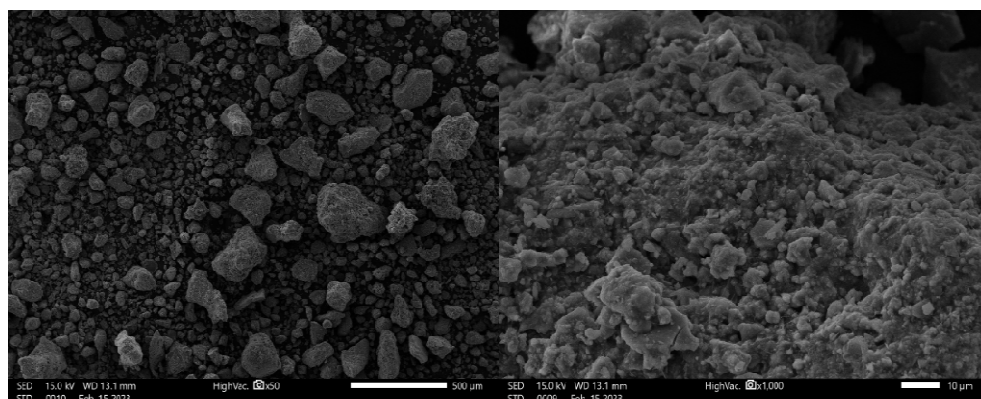


Рис. 1. СЭМ – изображение образца конвертерного шлака.

Оценка элементного состава шлака показала присутствие в отходе следующих элементов: Ca, C, O, Si, Mg, Al, Fe, Mn (табл. 1).

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

Рентгеноструктурный анализ зафиксировал, что Ca в образце находится преимущественно в фазах силиката, феррита и оксида, также присутствует фаза карбоната кальция.

Таким образом, установлено, что исследуемый образец шлака представляет собой мелкодисперсный порошок пористой структуры, с размером отдельных гранул 1–3 мм. В составе гранул содержатся следующие элементы: Ca, C, O, Si, Mg, Al, Fe, Mn. Ca представлен в виде соединений: CaSiO_3 , CaO, CaFe_2O_4 и CaCO_3 .

2.2 Результаты лабораторного эксперимента

Исследование влияния шлака металлургического производства на лабораторную всхожесть льна посевного показало отсутствие достоверного влияния отхода на показатель независимо от типа субстрата (рис. 2).

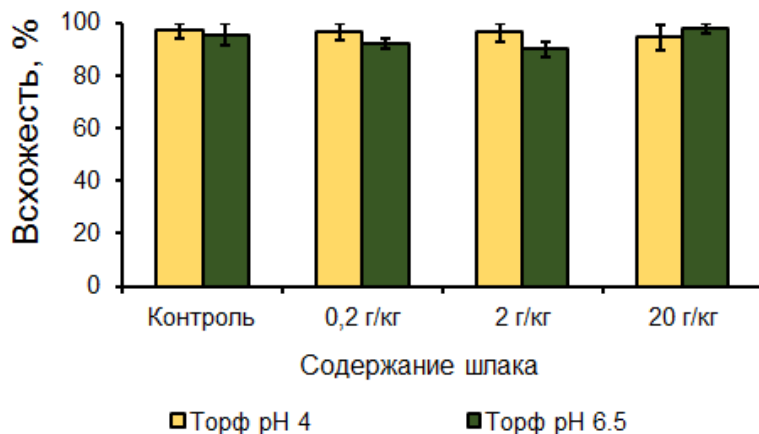


Рис. 2. Всхожесть льна в разных типах субстрата.

Анализ влияния шлака на морфометрические показатели тест-объекта в условиях закисленного грунта показал подавление роста корней – более чем в 3 раза при концентрации отхода 20 г/кг (рис. 3 а).

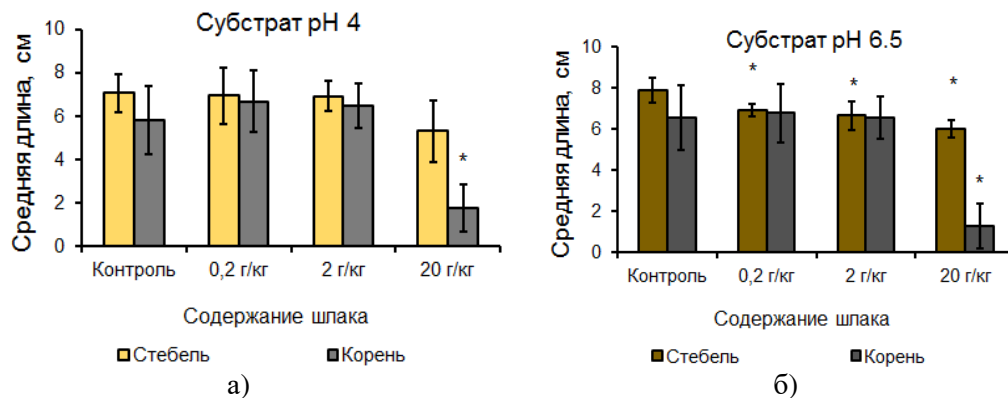


Рис. 3. Влияние шлака на морфометрические показатели проростков льна.

В условиях рН-нейтрального субстрата все концентрации шлака ингибировали прирост стебля (рис. 3 б). Максимальное подавление, почти на 2 см, отмечено в группе 20 г/кг. Значительное снижение длины корня наблюдалось при влиянии шлака в дозе 20 г/кг – показатель уменьшился более чем в 4 раза (рис. 3 б, 4 а, б).

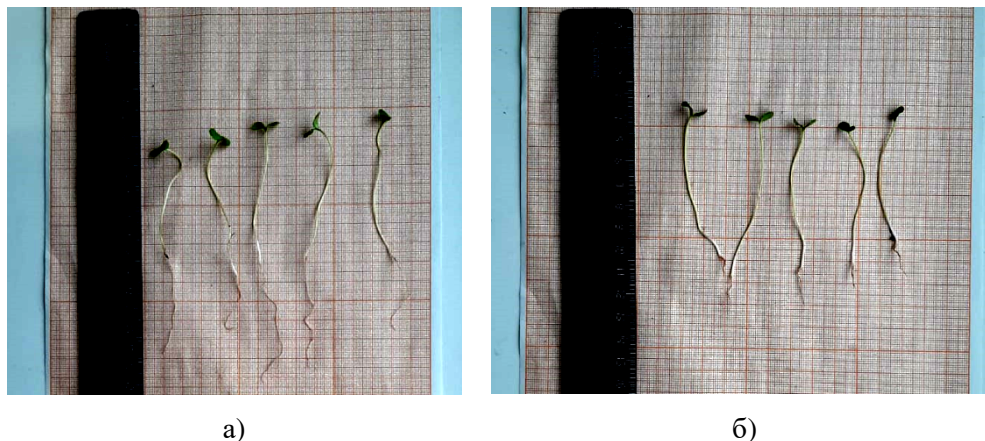


Рис. 4. Внешний вид проростков льна в среде нейтрального торфа: а) контроль; б) группа 20 г/кг.

Для растений льна отмечено положительное влияние шлака в концентрациях 0.2 и 2 г/кг на прирост сырой биомассы в закисленном грунте (рис. 5 а). В группе 2 г/кг прибавка сырой массы стебля составила около 22 %. Средняя сырая масса корня при 0.2 г/кг увеличилась в 10 раз, при 2 г/кг в 20 раз. Однако повышение дозы шлака в субстрате способствовало снижению показателей массы стебля в 2 раза. Анализ накопления сухой биомассы растений, выращенных в закисленном торфе, не выявил влияния шлака на данный показатель для стеблей, при этом тенденция увеличения массы корня в вариантах 0.2 и 2 г/кг все же сохранилась (рис. 5 б).

При замене кислой среды на нейтральную сохранилось положительное влияние низкой концентрации шлака на прирост сырой биомассы (рис. 5 в). Средняя масса стебля в варианте 0.2 г/кг увеличилась на 25 %. Масса корня растений из группы 0.2 г/кг была больше в 13 раз. Как и в закисленном грунте, при 20 г/кг шлака в среде наблюдалось снижение массы стебля в 1.5 раза. Анализ сухой биомассы также выявил положительное влияние шлака в минимальной и средней дозах (рис. 5 г). При 20 г/кг не отмечено различий с контрольными показателями.

В целом, по эксперименту можно отметить разнонаправленное действие конвертерного шлака на развитие проростков как в условиях закисленного грунта, так и нейтрального.

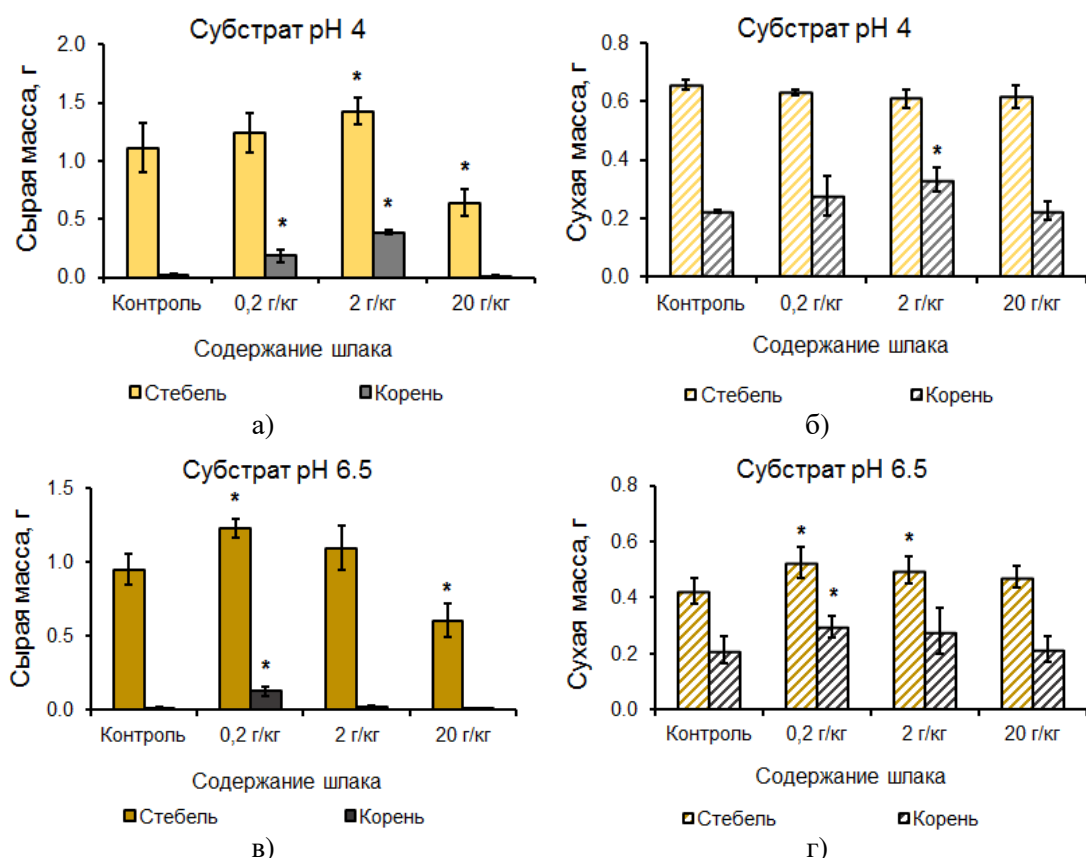


Рис. 5. Биомасса растений льна: а, в - сырая биомасса; б, г – сухая.

2.3 Результаты полевого эксперимента

2.3.1 Результаты фенологических наблюдений и оценки всхожести

В ходе проведения полевых опытов проводилась фиксация наступления фаз развития культур льна, включая появление всходов. Результаты показали отсутствие различий во времени наступления фаз развития льна между различными вариантами опыта. Так для всех групп растений отмечено появление всходов на 11-е сутки, наступление фазы елочка наблюдалось на 16-е сутки. В представленном опыте фаза бутонизации наступила на 28-е сутки, фаза цветения отмечена на 43-и сутки эксперимента, фаза ранней желтой спелости отмечена спустя 82 дня после посева.

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.

При культивировании льна в условиях слабокислой почвы не отмечено достоверного влияния конвертерного шлака на показатель урожайности (табл. 2).

Таблица 2.

Урожайность льносолемы

Варианты опыта	pH_{KCl} = 5.4	pH_{KCl} = 4.8-4.9
Без известкового фона		
1. Контроль (без удобрений)	4.40±0.31	3.94±0.11
2. N ₁₂ P ₁₆ K ₁₆	5.22±0.24	5.01±0.22
3. N ₄₅ P ₄₅ K ₈₀	5.68±0.32	5.02±0.19
4. N ₆₀ P ₄₅ K ₈₀	5.89±0.18	4.98±0.23
На фоне шлака		
1. Контроль (без удобрений)	4.41±0.28	4.02±0.13
2. N ₁₂ P ₁₆ K ₁₆	5.31±0.33	5.11±0.17
3. N ₄₅ P ₄₅ K ₈₀	5.69±0.27	5.19±0.21
4. N ₆₀ P ₄₅ K ₈₀	5.91±0.31	5.21±0.23
На фоне извести		
1. Контроль (без удобрений)	4.43±0.12	4.21±0.22
2. N ₁₂ P ₁₆ K ₁₆	5.25±0.21	5.01±0.11
3. N ₄₅ P ₄₅ K ₈₀	5.71±0.17	5.11±0.18
4. N ₆₀ P ₄₅ K ₈₀	5.79±0.19	4.99±0.15

В случае среднекислой почвы урожайность льносолемы немного увеличивалась (+4 %) при внесении удобрений N₄₅P₄₅K₈₀ и N₆₀P₄₅K₈₀ на фоне шлака, по сравнению с удобрениями без мелиоранта. Также отмечено, что внесение доз удобрений (2–4 вар.) способствовало повышению урожайности льносолемы, как без внесения известкового материала, так и на фоне шлака и извести.

2.3.3 Результаты анализа качества урожая

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

Химический состав льносолемы, полученной в условиях слабокислой почвы, на известковом фоне и без него изменялся незначительно (табл. 3).

При увеличении кислотности почвы наблюдалось небольшое уменьшение содержания N под действием шлака без удобрений, при увеличении показателя в вариантах с известью. В то же время, на фоне подкормки удобрением, максимальное

содержание N отмечено в варианте со шлаком. Количество P и K уменьшалось под действием всех мелиорантов.

Таблица 3.

Химический состав льносолумы, % сухой массы

Варианты опыта	рН _{KCl} = 5.4			рН _{KCl} = 4.8-4.9		
	N	P	K	N	P	K
Без известкового фона						
Контроль	0.80	0.34	1.49	1.16	0.24	1.39
N ₁₂ P ₁₆ K ₁₆	0.83	0.34	1.49	1.18	0.30	1.46
N ₄₅ P ₄₅ K ₈₀	0.86	0.35	1.58	1.19	0.30	1.48
N ₆₀ P ₄₅ K ₈₀	0.86	0.36	1.59	1.20	0.35	1.48
На фоне шлака						
Контроль	0.81	0.34	1.49	1.13	0.16	1.15
N ₁₂ P ₁₆ K ₁₆	0.83	0.34	1.50	1.27	0.18	1.29
N ₄₅ P ₄₅ K ₈₀	0.87	0.36	1.61	1.28	0.18	1.32
N ₆₀ P ₄₅ K ₈₀	0.87	0.36	1.62	1.29	0.20	1.32
На фоне извести						
Контроль	0.80	0.34	1.49	1.27	0.18	1.30
N ₁₂ P ₁₆ K ₁₆	0.83	0.34	1.49	1.24	0.18	1.33
N ₄₅ P ₄₅ K ₈₀	0.86	0.35	1.52	1.25	0.20	1.35
N ₆₀ P ₄₅ K ₈₀	0.86	0.36	1.53	1.24	0.21	1.35

Можно сделать вывод, что значимых отличий урожайности культуры на фоне шлака от значений имеющих показатели, полученных без известкового фона в условиях слабокислой почвы, не наблюдается, тем не менее, просматривается тенденция к увеличению данных показателей. Вместе с тем, при добавлении удобрения N₄₅P₄₅K₈₀ на фоне шлака и извести происходит идентичный прирост по показателям степени урожайности льна. В иных случаях, не упуская из внимания контрольные значения, показатели на фоне шлака были выше. Увеличение урожайности было отмечено в среднекислотной почве при внесении удобрений N₄₅P₄₅K₈₀ и N₆₀P₄₅K₈₀ на фоне шлака, по сравнению с удобрениями без мелиоранта. Также стоит отметить увеличение показателей, полученных на фоне шлака, по сравнению с данными, полученными на фоне извести. Химический состав льносолумы, полученной в условиях слабокислой почвы, на известковом фоне и без него изменялся незначительно. При кислотности почвы 4.8–4.9 установлено уменьшение содержания N под действием шлака без удобрений, при увеличении показателя в вариантах с известью. При этом, при внесении удобрений, максимальное содержание N отмечено в варианте со шлаком. Количество P и K уменьшалось под действием всех мелиорантов. В целом, на состав соломы льна изменение кислотности почвы не оказало существенного влияния, за исключением повышения содержания N на фоне шлака с удобрением. Подведем итоги: в условиях

полевого эксперимента отмечена слабая реакция льна, как на кислотность почвы, так и на внесение мелиорантов, хоть и установлена небольшая тенденция к увеличению ряда параметров. Похожий эффект наблюдался и с химическим составом льносолумы.

Современные исследования подтвердили предположения о пользе шлака в качестве основы для удобрений. Результаты многочисленных экспериментов говорят о больших перспективах в агрохимической практике повышения урожайности сельскохозяйственных культур [6, 17] и уменьшения закисления почвы [5]. В настоящей работе отмечены высокие показатели урожайности культуры льна. Наблюдалось увеличение параметров, полученных на фоне шлака, по сравнению с данными, полученными на фоне извести. В исследовании Осипова [18] отмечено, что известкование почв магнийсодержащими мартеновскими шлаками при внесении высоких норм минеральных удобрений обеспечивают более сбалансированное питание сельскохозяйственных культур и эффективнее, чем внесение извести. Не исключено, что это происходит из-за высокой активности взаимодействия шлаков с почвой, поэтому шлаки существенно превосходят природные карбонаты, а содержащиеся в них примеси микроэлементов часто оказывают положительное влияние на рост и развитие сельскохозяйственных растений [17, 19].

В другой исследовательской работе [7] сообщается, что за счет содержания Fe в шлаковых отходах, достигается эффект смягчения токсичности тяжелых металлов в почве и в самом растении. Стоит отметить, что при анализе элементного состава конвертерного шлака в настоящей работе также отмечено наличие Fe.

В данной работе при анализе химического состава льносолумы отмечено снижение количества P и K под действием всех мелиорантов. В работе Rodriguez с соавторами [20] наблюдался похожий эффект со шлаком, который за счет усиления конкуренции между K и Ca с Mg, входящих в состав шлака, вызвал уменьшение концентрации K в растении.

Полевому эксперименту можно отметить более слабую реакцию льна, как на кислотность почвы, так и на внесение различных мелиорантов. Подобную разницу между полевым и лабораторным экспериментом можно объяснить существованием неизбежных биотических и абиотических факторов [21]. Другой причиной может быть следующее: при лабораторных условиях в контроле в почве создают оптимальные экологические условия для биологических процессов и, соответственно, регистрируют максимальную биологическую активность почвы. В полевых условиях в почве редко бывает оптимум основных экологических факторов, поэтому величины показателей биологической активности в этом случае будут существенно меньше, чем в контроле в лабораторном опыте [22]. Соответственно, разница между контролем и вариантами опыта будет больше в лабораторном опыте, чем в полевом.

Таким образом, агроэкологические аспекты применения в сельскохозяйственном производстве шлаковых отходов промышленности в качестве химических мелиорантов чрезвычайно перспективно. При этом очень важно природоохранное значение применения шлаков, так как не только

освобождаются тысячи гектаров земли, занятых отвалами, но и обогащаются почвы Ca, Mg, P, Si и комплексом микроэлементов [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Металлургическая промышленность ежегодно сталкивается с проблемой переработки отходов с производств. Большую часть остаточного сырья составляют различные виды шлака. Одной из отраслей, позволяющей повторно использовать отходы промышленности, является сельское хозяйство. Шлаковые отходы содержат в своем составе ряд химических элементов, такие как Ca, Mg, P, Si и комплекс микроэлементов [23], необходимых для нормального развития растительных культур. Основной целью данной работы было изучение влияния шлаковых отходов на лен-долгунец для оценки возможного использования данного отхода в качестве почвенного мелиоранта.

Физико-химический анализ сталеплавильного шлака показал, что исследуемый образец отхода представляет собой мелкодисперсный порошок пористой структуры, с размером отдельных гранул 1–3 мм, в составе которого содержатся следующие элементы: Ca, C, O, Si, Mg, Al, Fe, Mn. Ca представлен в виде соединений: CaSiO_3 , CaO , CaFe_2O_4 и CaCO_3 .

Оценка всхожести льна под действием шлака металлургического производства в условиях лабораторного опыта с использованием контейнеров с нейтральным (pH 6,5) и закисленный (pH 4) торфом показала отсутствие различий опытных вариантов с контрольными значениями.

В ходе оценки воздействия шлака на прирост биомассы льна-долгунца в лабораторном эксперименте установлено разнонаправленное действие шлака, зависимое от кислотности субстрата. Отмечено благоприятное влияние шлака в дозах 0.2 и 2 г/кг на прирост биомассы, как в закисленном, так и в нейтральном грунте (+8–22 %). Однако если в кислом торфе максимальные показатели наблюдались при 2 г/кг, то при снижении кислотности среды максимум пришелся на дозу 0.2 г/кг. Концентрация 20 г/кг оказала ингибирующее действие в обоих типах грунта. После высушивания проростков при сохранении положительной динамики роста показателей в вариантах 0.2 и 2 г/кг, не наблюдалось отмеченного негативного действия шлака в максимальной дозе.

В полевом эксперименте установлено отсутствие различий во времени наступления фаз развития льна между различными вариантами опыта. Помимо этого, было обнаружено отсутствие существенных изменений уровня урожайности культуры на фоне шлака от значений показателей, полученных без известкового фона в условиях слабокислой почвы. Однако присутствовала тенденция к увеличению этих параметров. Увеличение в среднем на 0.7 % было зафиксировано при внесении удобрений на фоне шлака. Также стоит отметить, что внесение удобрения $\text{N}_{45}\text{P}_{45}\text{K}_{80}$ на фоне шлака и извести в среднем увеличило урожайность льносолумы на 29 % во всех случаях по сравнению с контролем. Иные случаи, в том числе и контрольные значения, на фоне шлака увеличились в среднем на 0.7 %.

В ходе эксперимента было установлено, что существенно не отличалась от значений показателей, полученных без известкового фона в условиях слабокислой почвы, урожайность культуры на фоне шлака, однако, при этом наблюдалась тенденция к увеличению данных параметров. Это позволило в среднем добиться увеличения в среднем на 0.7 %. Помимо этого, мы отметили увеличение во всех вариантах в среднем на 29 % в сравнении с контролем урожайность льносоломы на фоне шлака и извести при внесении удобрения $N_{45}P_{45}K_{80}$. Иные же случаи всегда давали показатели на фоне шлака выше в среднем на 0.7%, включая контрольные значения. В случае среднекислой почвы установлено увеличение (+4 %) урожайности при внесении удобрений $N_{45}P_{45}K_{80}$ и $N_{60}P_{45}K_{80}$ на фоне шлака, по сравнению с удобрениями без мелиоранта. Также установлено увеличение показателей, полученных на фоне шлака, по сравнению с показателями, полученных на фоне извести в среднем на 1 %. Химический состав льносоломы, полученной в условиях слабокислой почвы, на известковом фоне и без него изменялся незначительно. При кислотности почвы 4.8–4.9 установлено уменьшение содержания N под действием шлака без удобрений, при увеличении показателя в вариантах с известью на 0.14 %. При этом, при внесении удобрений, максимальное содержание N отмечено в варианте со шлаком. Количество P и K уменьшалось под действием всех мелиорантов. В целом по полевому эксперименту можно отметить более слабую реакцию льна, как на кислотность почвы, так и на внесение различных мелиорантов.

Таким образом, по результатам проведенных экспериментов в лабораторных и полевых условиях, показана возможность использования исследованного шлака в сельскохозяйственном производстве на примере льна посевного.

Список литературы

1. Валуев Д. В. Технологии переработки металлургических отходов / Валуев Д. В., Гизатулин Р. А. // Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2012.
2. Волынкина Е. П. Анализ состояния и проблем переработки техногенных отходов в России / Волынкина Е. П. // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2017. – №. 2 (20). – С. 43–49.
3. Бельский С. С. Современное состояние переработки шлаков сталеплавильного производства / Бельский С. С. и др. // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25, №. 6 (161). – С. 782–794.
4. Ito K. Steelmaking Slag for Fertilizer Usage. / Ito K. // Nippon steel & sumitomo metal technical report – 2015. – No 109. – С. 130–136.
5. 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.) / Gwon H. S. et al. // Journal of hazardous materials. – 2018. – Vol. 353. – P. 236–243.
6. White B. Effect of silicate slag application on wheat grown under two nitrogen rates / White B. et al. // Plants. – 2017. – Vol. 6, No 4. – P. 47.
7. Ning D. Impacts of steel-slag-based silicate fertilizer on soil acidity and silicon availability and metals-immobilization in a paddy soil / Ning D. et al. // PLoS One. – 2016. – Vol. 11, No 12. – P. e0168163.
8. Kühn M. Sustainable agriculture using blast furnace and steel slags as liming agents / Kühn M. et al. // EUR. – 2006. – No 22033. – P. 1–152.
9. Takahashi T. New application of iron and steelmaking slag / Takahashi T., Yabuta K. // NKK Technical Report-Japanese Edition-. – 2002. – P. 43–48.

10. Anderson W. B. Plant availability of an iron waste product utilized as an agricultural fertilizer on calcareous soil / Anderson W. B., Parkpian P. // Journal of Plant Nutrition. – 1984. – Vol. 7, No 1-5. – P. 223–233.
11. Xian W. Steel slag as an iron fertilizer for corn growth and soil improvement in a pot experiment / Xian W., Qing-Sheng C. A. I. // Pedosphere. – 2006. – Vol. 16, No 4. – P. 519–524.
12. Чухина О. В. Изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой почвы при применении удобрений / Чухина О. В. // Агрохимический вестник. – 2013. – №. 3. – С. 011–014.
13. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). / Доспехов Б. А. – 1985.
14. Хомяков Д. М. Оптимизация системы удобрений и агрометеорологические условия / Хомяков Д. М. // М.: Изд-во МГУ. – 1991.
15. Чухина О. В. Сорта основных полевых культур, многолетних трав, допущенные к использованию в Северо-Западном регионе и районированные в Вологодской области. / Чухина О. В., Демидова А. И. – 2018.
16. Branca T. A. Possible uses of steelmaking slag in agriculture: an overview. / Branca T. A., Colla V. – Intech Open, Rijeka, Croatia, 2012. – P. 335–356.
17. Якушев В. П. Химическая мелиорация почв-вчера, сегодня, завтра / Якушев В. П., Осипов А. И. // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2013. – №. 30. – С. 68–72.
18. Осипов А. И. История и практические аспекты известкования кислых почв в России / Осипов А. И. // Агрохимический вестник. – 2019. – №. 3. – С. 28–36.
19. Осипов А. И. Научные основы химической мелиорации почв и перспективы их дальнейшего изучения / Осипов А. И. // Агрофизика. – 2012. – Т. 3. – С. 41–50.
20. Rodriguez M. Basic Linz-Donawitz Slag as a Liming Agent for Pastureland / Rodriguez M. et al. // Agronomy Journal. – 1994. – Vol. 86, No 5. – P. 904–909.
21. Xu X. A threefold difference in plant growth response to nitrogen addition between the laboratory and field experiments / Xu X., Yan L., Xia J. // Ecosphere. – 2019. – Vol. 10, No 1. – P. e02572.
22. Колесников С. И. Сопоставление результатов лабораторного и полевого моделирования химического загрязнения почв / Колесников С. И. и др. // Агрохимия. – 2013. – №. 5. – С. 86–94.
23. Шильников И. А. Использование отходов промышленности в качестве известковых удобрений / Шильников И. А. и др. // Плодородие. – 2009. – №. 6. – С. 2–4.

INFLUENCE OF STEEL-STEEL SLAG ON PLANTS OF FLAX-DEPENDING ON ACIDITY OF THE ENVIRONMENT

Baranchikov P. A.¹, Chebotaryova S. P.¹, Zakharova O. V.^{1,2,3}, Grigoriev G. V.¹, Volokhov S. V.⁴, Kuznetsov D. V.³, Mishnev P. A.⁴, Adigamov R. R.⁴, Gusev A. A.^{1,2,3}

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*

⁴*JSC Severstal Management, Cherepovets, Vologda Region, Russia*

E-mail: petrovi4-98@yandex.ru

One of the most important problems of our time is the formation and processing of man-made waste, the accumulation of which leads not only to environmental pollution, but is also a consequence of the irrational use of primary natural resources. The metallurgical industry annually faces the problem of processing waste from production.

Most of the residual raw materials are various types of slag and sludge. A significant part of non-recyclable waste is ferrous metallurgy waste, in particular converter slag. The possibility of reusing industrial waste is one of the most demanded tasks of our time. One of the promising industries that allows you to reuse waste is agriculture. Metallurgical waste contains a number of chemical elements necessary for the normal development of plant crops.

The purpose of this study was to assess the applicability of converter slag in agricultural production as a soil ameliorant in the cultivation of fiber flax.

To conduct experiments to assess the impact of waste on the above culture, model substrates with different acidity were developed. The slag sample is a fine powder of a porous structure, with the size of individual granules 1–3 mm.

In a laboratory experiment, the absence of a significant effect of slag on the germination of the culture was established. An analysis of the morphometric parameters of the culture established a decrease in the length of the root by an average of 4 cm in the 20 g/kg variant under acidified soil conditions. Under conditions of a pH-neutral substrate, all slag concentrations inhibited stem growth.

In the field experiment, it was found that there were no differences in the time of onset of the phases of flax development between different variants of the experiment. Yield values for fertilization against the background of slag were increased by an average of 0.7 % in slightly acidic soil conditions. In the case of moderately acidic soil, an increase (+4 %) in the yield was found when $N_{45}P_{45}K_{80}$ and $N_{60}P_{45}K_{80}$ fertilizers were applied against the background of slag. The chemical composition of flax straw obtained under conditions of slightly acidic soil, on a calcareous background and without it, changed insignificantly. With soil acidity of 4.8–4.9 when fertilizing, the maximum N content was noted in the variant with slag. Thus, the possibility of using the studied converter slag in agricultural production is shown.

Keywords: converter slag, ameliorants, soil deoxidation, fiber flax.

References

1. Valuev D. V., Gizatulin R. A. *Technologies for the processing of metallurgical waste: textbook. new allowance* (Publishing House of Tomsk Polytechnic University: Tomsk, 2013).
2. Volynkina E. P. Analysis of the state and problems of industrial waste processing in Russia. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*, **2**, 23 (2017).
3. Belsky S. S., Zaitseva A. A., Tyutrin A. A., Ismoilov Z. Z., Baranov A. N., Sokolnikova Yu. V. The current state of the processing of steelmaking slags. *Bulletin of ISTU*, **6** (2021).
4. Ito K. Steelmaking slag for fertilizer usage. *Nippon steel and Sumitomo metal technical report*, **109**, 130 (2015).
5. 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.). *J Hazard Mater*, **353**, 236 (2018) doi:10.1016/j.jhazmat.2018.04.023.
6. White B., Tubana B., Babu T., Mascagni H., Bastos Agostinho F., Datnoff L., Harrison S. Effect of Silicate Slag Application on Wheat Grown Under Two Nitrogen Rates. *Plants*, **6**, (2017) doi:10.3390/plants6040047.
7. 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**, e0168163 (2016) doi:10.1371/journal.pone.0168163.

8. Kühn M., Spiegel H., Lopez A. F., Rex M., Erdmann R. *Sustainable agriculture using blast furnace and steel slags as liming agents* (2006).
9. Takahashi T., Yabuta K. New Applications for Iron and Steelmaking Slag. *NKK Technical Review* (2002).
10. Anderson W. B., Parkpian P. Plant availability of an iron waste product utilized as an agricultural fertilizer on calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition*, **7**, 223 (1984).
11. Wang X., Cai Q. Steel Slag as an Iron Fertilizer for Corn Growth and Soil Improvement in a Pot Experiment I. *Pedosphere*, **16**, 519 (2006) doi:10.1016/S1002-0160(06)60083-0.
12. Chukhina O. V. Changes in the agrochemical parameters of soddy-podzolic soil when applying fertilizers. *Agrochemical Bulletin*, **11** (2013).
13. Dospekhov B. A. *Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results)* (Agropromizdat: Moscow, 1991).
14. Khomyakov D. M. *Optimization of the fertilizer system and agrometeorological conditions* (Moscow State University Press: Moscow, 1991).
15. 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).
16. Branca T., Colla V. *Possible Uses of Steelmaking Slag in Agriculture: An Overview* (2012).
17. Yakushev V. P., Osipov A. I. Chemical melioration of soils – yesterday, today, tomorrow. *Proceedings of St. Petersburg State Agrarian University*, **68** (2013).
18. Osipov A. I. History and practical aspects of liming of acidic soils in Russia. *Agrochemical Bulletin* (2019).
19. Osipov A. I. Scientific bases of chemical melioration of soils and prospects for their further study. *Agrophysics*, **41** (2012).
20. Rodriguez M., Lope F. A., Pinto M., Balcazar N., Besga G. Basic Linz-Donawitz slag as a liming agent for pastureland. *Agronomy Journal*, **86**, 904 (1994) doi:10.2134/agronj1994.00021962008600050027x.
21. Xiaoni X., Yan L., Xia J. A threefold difference in plant growth response to nitrogen addition between the laboratory and field experiments, *Ecosphere*, **10** (2019) doi:10.1002/ecs2.2572.
22. Kolesnikov S. I., Zharkova M. G., Kutuzova I. V., Kazeev K. Sh. Comparison of the results of laboratory and field modeling of soil chemical pollution. *Agrochemistry*, **86** (2013).
23. Shilnikov I. A., Akanova N. I., Zelenov N. A., Marenkova M. G. Using industrial waste as lime fertilizers. *Fertility* (2009).