

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 1 / 2026, Vol. 18, Iss. 1 <https://esj.today/issue-1-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/29NZVN126.pdf>

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Монастырский, Д. И. Экологическая безопасность органоминеральных удобрений из гидросмыва свиного комплекса и восстановленного фосфогипса / Д. И. Монастырский, М. А. Куликова // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 1. — URL: <https://esj.today/PDF/29NZVN126.pdf>.

For citation:

Monastyrsky D.I., Kulikova M.A. Environmental safety of organomineral fertilizers from pig farm hydrowash and reconstituted phosphogypsum. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(1): 29NZVN126. Available at: <https://esj.today/PDF/29NZVN126.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 504.062

Монастырский Даниил Иванович

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»,
Новочеркасск, Россия

Старший преподаватель кафедры «Экология и промышленная безопасность»

E-mail: danya.monastyrskij.95@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6323-8073>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1177297

Куликова Марина Анатольевна

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»,
Новочеркасск, Россия

Доцент кафедры «Экология и промышленная безопасность»

Кандидат технических наук

E-mail: my7rysyk@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4000-0040>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=667087

**Экологическая безопасность
органоминеральных удобрений из гидросмыва
свиного комплекса и восстановленного фосфогипса**

Аннотация. В настоящем исследовании акцентируется внимание на вопросе нейтрализации многокомпонентных жидких отходов (гидросмыва), образующихся в процессе деятельности свиноводческих комплексов. В работе предложен и изучен способ коррекции указанных сред с использованием фосфогипса, подвергнутого термической модификации методом восстановления. Основной целью проведенной работы стала комплексная оценка агрохимических параметров и степени экологической безопасности твердого осадка и жидкой фазы, сформировавшихся в результате обработки модельных сточных вод модифицированным фосфогипсом. В рамках исследований осуществлен детальный анализ физико-химических свойств и элементной структуры образующегося осадка. Полученные данные свидетельствуют о высоком содержании в нем органической составляющей (до 90,8 %) и значительных концентрациях ключевых питательных элементов: общего азота (2,3 %), фосфора (7,8 %) и калия (0,25 %). Для определения ксического потенциала и возможного стимулирующего воздействия продуктов переработки было проведено биотестирование с использованием семян редиса. Оптимизация условий оценки достигнута за счет применения метода планирования эксперимента, а именно симплекс-решетчатого плана, что позволило проанализировать и

смоделировать совокупное влияние трех независимых факторов: концентрации вносимого препарата, температуры и режима увлажнения на показатели всхожести семян и линейного роста проростков.

Анализ результатов экспериментальной работы демонстрирует необходимость обязательного разбавления как жидкой, так и твердой фракций перед их потенциальным применением. Установлены безопасные с экологической точки зрения и обладающие ростостимулирующей активностью диапазоны разбавления: для надосадочной жидкости — 40–60 %, для твердого осадка — до 60 %. Разрабатываемый технологический подход направлен на одновременное решение двух значимых экологических проблем: утилизации отходов животноводства и вовлечения в ресурсный цикл вторичного сырья химической промышленности.

Ключевые слова: гидросмыв свинокомплекса; фосфогипс; органоминеральное удобрение; биотестирование; экологическая безопасность; утилизация отходов

Введение

Вопрос обезвреживания гидросмыва свиноводческих предприятий сохраняет свою актуальность, главным образом, из-за сложного состава загрязнений, который формируют не только органические соединения, но и биогенные элементы, антибиотики и ионы тяжёлых металлов [1–4]. Эффективным инструментом начальной коррекции таких сред служат высокощелочные реагенты. Их применение позволяет не только провести нейтрализацию кислотного компонента, но также способствует осаждению металлов и создаёт условия, оптимальные для функционирования последующих стадий очистки. Рост объёмов животноводческой продукции неизбежно ведёт к увеличению нагрузки на локальные очистные сооружения [5; 6]. В настоящее время утилизация навозных стоков реализуется преимущественно по двум схемам: подготовка к агротехническому использованию либо глубокая очистка до соответствия нормативам сброса. Первый путь наиболее характерен для хозяйств, обладающих значительными земельными ресурсами [7; 8]. К числу технических решений относится, например, метод, основанный на коагуляции карбидным шламом в щелочной среде (pH 10–11) с последующим подкислением и удалением образовавшегося осадка [9; 10]. Альтернативой служит комбинированная обработка дефекатом сахарного производства и аммофосом, что открывает возможность совместной переработки отходов двух отраслей [11]. Параллельно с поиском эффективных сорбционных материалов природного происхождения, перспективным направлением рассматривается вовлечение в технологический цикл вторичных продуктов промышленности. Фосфогипс (ФГ) представляет собой крупнотоннажный отход, текущие методы переработки которого — от производства строительных материалов до извлечения редких металлов — не решают проблему в полном объёме [12; 13]. Одним из потенциальных способов утилизации является термическое разложение ФГ. Согласно данным термодинамического моделирования, процесс восстановления сульфата кальция в условиях, имитирующих угольное сжигание, включает 32 реакции. Анализ показал, что интервал 1 173–1 273 К является оптимальным для десульфурации. Определены десять ключевых стадий, причём экзотермический характер некоторых из них создаёт предпосылки для автотермического протекания процесса. Интересно, что реакции окисления в данной системе оказываются термодинамически более вероятными, чем восстановительные; в частности, отмечается конкуренция между окислением сульфида кальция кислородом и восстановлением сульфата монооксидом углерода или углеродом [14]. Точный контроль температурного режима позволяет максимизировать выход целевых продуктов — оксида кальция и диоксида серы.

В экспериментальных условиях была проведена оценка различных восстановителей для модификации ФГ. Наибольшую эффективность продемонстрировали отходы растительного

происхождения — лузга подсолнечника, рисовая шелуха и древесная щепа, тогда как древесный уголь показал худший результат. Критическим параметром оказалась температура обработки: при значениях ниже 900°C не достигалось ни полного сгорания восстановителя, ни требуемого уровня щёлочности. Преодоление этого температурного порога позволило получить стабильные образцы, которые при контакте с модельными сточными водами индуцировали быстрое образование осадка. Наибольшей коагулирующей способностью, особенно в отношении коллоидных систем стоков свиноводства, обладали материалы с $pH > 10$. Примечательно, что характеристики формирующегося осадка (степень уплотнения, скорость седиментации) слабо коррелировали с дозировкой реагента, но сильно зависели от условий его синтеза — температуры и продолжительности восстановительной обработки [14; 15]. Полученные результаты открывают возможность рассмотреть продукты переработки ФГ не только в качестве коагулянта, но и как основу для создания органоминеральных составов. Цель настоящей работы — оценить агрохимические свойства и экологическую безопасность осадка и надосадочной жидкости, полученных в результате обработки модельных стоков модифицированным фосфогипсом. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: определить физико-химические характеристики и элементный состав полученного твёрдого осадка; спланировать и провести лабораторный биотест на чувствительности редиса к исследуемым продуктам; проанализировать влияние осадка и надосадочной жидкости на начальные стадии онтогенеза растений (всхожесть, длина ростка).

1. Материалы и методы

Планирование эксперимента по оптимизации проращивания редиса на основе модели поверхности отклика было проведено с применением симплекс-решетчатого плана на основе математической модели Шеффе.¹ Он ввел формулу полинома степени n :

$$\hat{y} = \sum_{1 \leq i \leq q} \beta_i x_i + \sum_{m=2}^n \left\{ \sum_{1 \leq i < j \leq q} \beta_{ij}^{(m)} x_i x_j (x_i - x_j)^{m-2} \right\} + \sum_{m=3}^n \left\{ \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_m \leq q} \beta_s x_{i_1}^{s_1} x_{i_2}^{s_2} \dots x_{i_m}^{s_m} \right\}$$

Были построены диаграммы влияния параметров на количество проросших семян и величину средней длины ростка вместе с корешком.

В качестве параметров были выбраны: разбавление исходного удобрения (x_1 , концентрация удобрения от 20 % до 100 %), температура (x_2 , варьирование от 20°C до 32°C), частота полива (x_3 , варьирование от 1 до 3). В каждой точке плана реализовывали 2 параллельных опыта.

Значения коэффициентов для трех технологических факторов модели второго порядка для выявления влияния параметров на количество проросших семян вычисляли по формулам (табл. 1):

$$\hat{y} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3,$$

$$\beta_1 = y_1 = 27,0;$$

$$\beta_2 = y_2 = 23,0;$$

$$\beta_3 = y_3 = 15,0;$$

$$\beta_{12} = 4y_{12} - 2y_1 - 2y_2 = -4;$$

¹ Зариковская Н.В. // Основы математического моделирования. Учебное пособие. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроник (ТУСУР), 2012 г. — 244 с.

$$\beta_{13} = 4y_{13} - 2y_1 - 2y_3 = -8;$$

$$\beta_{23} = 4y_{23} - 2y_2 - 2y_3 = 4.$$

Приведенный полином второй степени имеет вид:

$$\hat{y} = 27x_1 + 23x_2 + 15x_3 - 4x_1x_2 - 8x_1x_3 + 4x_2x_3.$$

Таблица 1

Данные для построения диаграммы зависимости параметров на количество проросших семян редиса, при проращивании которого используется полученное органоминеральное удобрение, от значения разбавления исходного удобрения, температуры, частоты полива

№ опыта	Влияние факторов, доля ед.			Количество проросших семян		Средняя оценка влияния фактора $\bar{y}$
	x_1	x_2	x_3	1 измерение	2 измерение	
1	1	0	0	29	25	$\hat{y}_1 = 27,0$
2	0	1	0	24	22	$\hat{y}_2 = 23,0$
3	0	0	1	16	14	$\hat{y}_3 = 15,0$
4	0	0,5	0,5	26	24	$\hat{y}_{23} = 20,0$
5	0,5	0,5	0	26	22	$\hat{y}_{12} = 24,0$
6	0,5	0	0,5	20	18	$\hat{y}_{13} = 19,0$
7	0,33	0,33	0,33	28	30	$\hat{y}_{123} = 21,0$
8	0	0,7	0,3	23	21	22,0 Проверочная точка
9	0,7	0,3	0	25	25	25,0 Проверочная точка
10	0,3	0,5	0,2	24	20	22,0 Проверочная точка
11	0,2	0,6	0,2	22	21	22,0 Проверочная точка

0

Величина бета-коэффициентов позволяет сравнивать относительный вклад каждой независимой переменной в предсказание изменения зависимой переменной. Как видно из таблицы результатов и приведенного полинома, переменные x_1 и x_2 являются наиболее важными предикторами для количества проросших семян. Из этой пары концентрация удобрения является наиболее важным фактором.

На рисунке 1 приведены контурные кривые поверхности отклика.

Для проверки адекватности полученной модели были проведены два параллельных опыта в пяти проверочных точках, одна из которых расположена в центре симплекса (опыты № 7, 8, 9, 10, 11).

Математические ожидания отклика в проверочных точках

$$\text{Опыт 7: } \hat{y} = 27 \cdot 0,33 + 23 \cdot 0,33 + 15 \cdot 0,33 - 4 \cdot 0,33 \cdot 0,33 - 8 \cdot 0,33 \cdot 0,33 + 4 \cdot 0,33 \cdot 0,33 = 20,58.$$

$$\text{Рассчитаем дисперсию } d = |\hat{y} - \bar{y}| = |21 - 20,58| = 0,42.$$

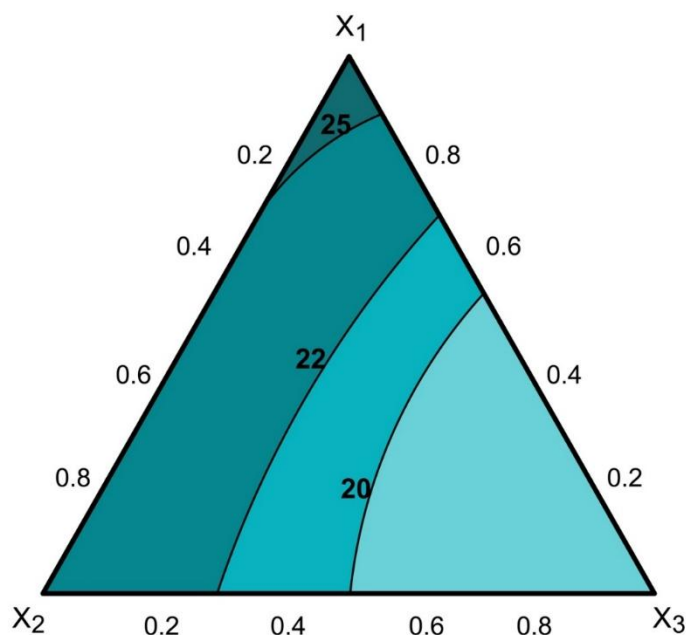


Рисунок 1. Контурные кривые для поверхности отклика (разработано автором)

Вычислим экспериментальное значение критерия Стьюдента (t -критерий, t_p) при числе параллельных опытов, равном 2 ($r = 2$), дисперсия опыта $\sigma^2\{y\} = 0,34$:

$$t_p = (d_{ijk} \cdot \sqrt{2}) / (\sigma^2\{y\} \cdot 1,276) = (0,42 \cdot \sqrt{2}) / (0,34 \cdot 1,276) = 1,37.$$

$$\text{Опыт 8: } \hat{y} = 23 \cdot 0,7 + 15 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,7 \cdot 0,3 = 21,44; d = 0,56; t_p = 1,83.$$

$$\text{Опыт 9: } \hat{y} = 27 \cdot 0,7 + 23 \cdot 0,3 - 4 \cdot 0,3 \cdot 0,7 = 24,96; d = 0,04; t_p = 0,13.$$

$$\text{Опыт 10: } \hat{y} = 27 \cdot 0,3 + 23 \cdot 0,5 + 15 \cdot 0,2 - 4 \cdot 0,3 \cdot 0,5 - 8 \cdot 0,3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 21,92; d = 0,08; t_p = 0,26.$$

$$\text{Опыт 11: } \hat{y} = 27 \cdot 0,2 + 23 \cdot 0,6 + 15 \cdot 0,2 - 4 \cdot 0,2 \cdot 0,6 - 8 \cdot 0,2 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,6 \cdot 0,2 = 21,88; d = 0,12; t_p = 0,39.$$

Экспериментальное значение t -критерия меньше табличного $t_r = 2,26$, модель второго порядка адекватно описывает результаты эксперимента.

Значения коэффициентов для трех технологических факторов модели второго порядка для выявления влияния параметров на длину ростков вычисляли по формулам (табл. 2):

$$\hat{y} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3,$$

$$\beta_1 = y_1 = 18,0;$$

$$\beta_2 = y_2 = 13,5;$$

$$\beta_3 = y_3 = 15,5;$$

$$\beta_{12} = 4y_{12} - 2y_1 - 2y_2 = 1;$$

$$\beta_{13} = 4y_{13} - 2y_1 - 2y_3 = 1;$$

$$\beta_{23} = 4y_{23} - 2y_2 - 2y_3 = 0.$$

Приведенный полином второй степени имеет вид:

$$\hat{y} = 18x_1 + 13,5x_2 + 15,5x_3 + x_1x_2 + x_1x_3.$$

Величина бета-коэффициентов позволяет сравнивать относительный вклад каждой независимой переменной в предсказание изменения зависимой переменной. Как видно из таблицы результатов и приведенного полинома, переменные x_1 и x_3 являются наиболее важными предикторами для длины ростков. Из этой пары концентрация удобрения является наиболее важным фактором.

Таблица 2

Данные для построения диаграммы зависимости параметров на длину ростков редиса, при проращивании которого используется полученное органоминеральное удобрение, от значения разбавления исходного удобрения, температуры, частоты полива

№ опыта	Влияние факторов, доля ед.			Длина проросших ростков		Средняя оценка влияния фактора $\bar{y}$
	x_1	x_2	x_3	1 измерение	2 измерение	
1	1	0	0	19	17	$\hat{y}_1 = 18,0$
2	0	1	0	13	14	$\hat{y}_2 = 13,5$
3	0	0	1	16	15	$\hat{y}_3 = 15,5$
4	0	0,5	0,5	14	15	$\hat{y}_{23} = 14,5$
5	0,5	0,5	0	17	15	$\hat{y}_{12} = 16,0$
6	0,5	0	0,5	15	19	$\hat{y}_{13} = 17,0$
7	0,33	0,33	0,33	14	18	$\hat{y}_{123} = 16,0$
8	0	0,7	0,3	13	15	14,0 Проверочная точка
9	0,3	0,7	0	16	15	15,5 Проверочная точка
10	0,7	0,3	0	16	18	17,0 Проверочная точка
11	0,3	0,3	0,4	14	18	16,0 Проверочная точка
12	0,2	0,6	0,2	15	14	14,5 Проверочная точка

Составлено автором

На рисунке 2 приведены контурные кривые поверхности отклика.

Для проверки адекватности полученной модели были проведены два параллельных опыта в пяти проверочных точках, одна из которых расположена в центре симплекса (опыты № 7, 8, 9, 10, 11).

Математические ожидания отклика в проверочных точках.

$$\text{Опыт 7: } \hat{y} = 18 \cdot 0,33 + 13,5 \cdot 0,33 + 15,5 \cdot 0,33 + 0,33 \cdot 0,33 + 0,33 \cdot 0,33 = 15,73.$$

$$\text{Рассчитаем дисперсию } d = |\hat{y} - \bar{y}| = |16 - 15,73| = 0,27.$$

Вычислим экспериментальное значение критерия Стьюдента (t -критерий, t_p) при числе параллельных опытов, равном 2 ($r = 2$), дисперсия опыта $\sigma^2\{y\} = 0,34$:

$$t_p = (d_{ijk} \cdot \sqrt{2}) / (\sigma^2\{y\} \cdot 1,276) = (0,27 \cdot \sqrt{2}) / (0,34 \cdot 1,276) = 0,89.$$

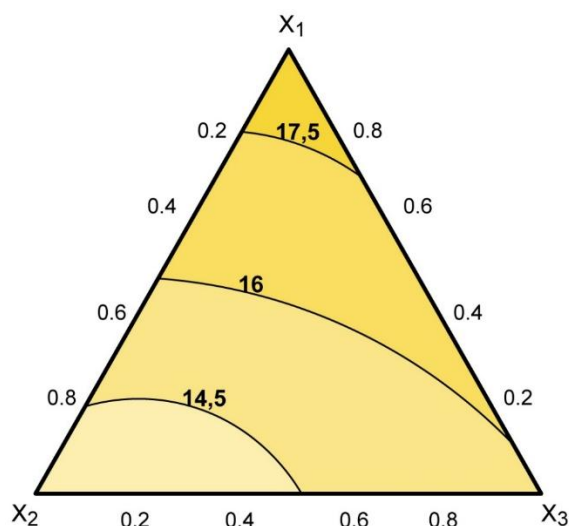


Рисунок 2. Контурные кривые для поверхности отклика (разработано автором)

Опыт 8: $\hat{y} = 13,5 \cdot 0,7 + 15,5 \cdot 0,3 = 14,1$; $d = 0,1$; $t_p = 0,33$.

Опыт 9: $\hat{y} = 18 \cdot 0,3 + 13,5 \cdot 0,7 + 0,3 \cdot 0,7 = 15,06$; $d = 0,44$; $t_p = 1,43$.

Опыт 10: $\hat{y} = 18 \cdot 0,7 + 13,5 \cdot 0,3 + 0,3 \cdot 0,7 = 16,86$; $d = 0,14$; $t_p = 0,46$.

Опыт 11: $\hat{y} = 18 \cdot 0,3 + 13,5 \cdot 0,3 + 15,5 \cdot 0,4 + 0,3 \cdot 0,3 + 0,3 \cdot 0,4 = 15,86$; $d = 0,14$; $t_p = 0,46$.

Опыт 12: $\hat{y} = 18 \cdot 0,2 + 13,5 \cdot 0,6 + 15,5 \cdot 0,2 + 0,2 \cdot 0,6 + 0,2 \cdot 0,2 = 14,96$; $d = 0,46$; $t_p = 1,5$.

Экспериментальное значение t -критерия меньше табличного $t_{\tau} = 2,26$, модель второго порядка адекватно описывает результаты эксперимента.

Органическая часть удобрений (гумус, компост, навоз, торф и др.) определяли методом сухого озоления (прокаливания), в полученном органоминеральном удобрении содержится 47,6 % (масс.) органических веществ и 52,4 % (масс.) минеральных веществ. Осадки содержат органические и минеральные компоненты, которые можно количественно определить с помощью лабораторных методов. Таким образом, в осадке содержится 9,2 % (масс.) минеральных веществ и 90,8 % (масс.) органических веществ. Плотность осадка $\rho = 1,02$ г/мл. Определение влажности осадка проводится для оценки содержания воды в образце, влажность осадка — 82,7 %. Это важный параметр при переработке отходов, оценке качества удобрений и контроле технологических процессов. Высокое содержание органической части и умеренная зольность свидетельствуют о высокой питательной ценности материала. Значительная влажность требует специальных подходов к сушке и переработке.

Полученные результаты лабораторных исследований свидетельствуют о высоких концентрациях основных биогенных элементов: общего азота, общего фосфора и общего калия, остальные показатели соответствуют требованиям, предъявляемым к удобрениям. Полученный материал может быть использован в качестве удобрения при соблюдении ряда условий: значительном снижении расчетных доз осадка, вносимого в почву (в 2 и более раз); разбавлении осадка и внесении его на почвах с низким содержанием гумуса. Лабораторные испытания проведены в Ростовском филиале ФГБУ «РосАгрохимслужба», для испытаний использовали полученное органоминеральное удобрение после 24 часов отстаивания, результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Показатели качества и безопасности удобрений по нормативным документам (НД)

Наименование показателей качества и безопасности НД, единицы измерения	НД на методы испытаний (исследований)	Фактическое значение показателей качества по результатам испытаний	Погрешность/неопределенность
1	2	3	4
Массовая доля сухого остатка, %	ОСТ 26713-85, Удобрения органические. Метод определения влаги и сухого остатка	54,7	0,8
pH суспензии, ед. pH	ОСТ 27979-88, Удобрения органические. Метод, определения pH	6,3	0,3
Массовая доля общего азота, %*	ГОСТ 26715-85, Удобрения органические. Методы определения общего азота	2,3	0,2
Массовая доля общего фосфора, %*	ГОСТ 26717-85, Удобрения органические. Метод определения общего фосфора	7,8	0,3
Массовая доля общего калия, %*	ГОСТ 26718-85, Удобрения органические. Метод определения общего калия	0,25	
Массовая доля свинца (Pb), мг/кг	ГОСТ Р 53218-2008 Удобрения органические. Атомно-абсорбционный метод определения содержания тяжелых металлов	4,61	1,61
Массовая доля кадмия (Cd), мг/кг		0,41	0,14
Массовая доля меди (Cu), мг/кг		более 200	
Массовая доля цинка (Zn), мг/кг	ГОСТ Р 53218-2008 Удобрения органические. Атомно- абсорбционный метод определения содержания тяжелых металлов	более 200	
Массовая доля никеля (Ni), мг/кг	ГОСТ Р 53218-2008 Удобрения органические. Атомно-абсорбционный метод определения содержания тяжелых металлов. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства (издание 2-е, переработанное и дополненное) (утв. ВПНО «Союзсельхозхимия» от 10.03.1992), п. 5	9,18	3,21
Массовая доля хрома (Cr), мг/кг		более 10	
Массовая доля ртути (Hg), мг/кг		менее 0,7	
Массовая доля мышьяка (As), мг/кг	Методические указания по определению мышьяка в почвах фотометрическим методом (Минсельхозом России от 26.02.1993)	1,3	0,2

* Отмечены показатели, превышающие нормативные значения. Составлено автором

Ключевыми ограничивающими факторами для массового использования гидросмыва свинокомплексов, являются высокая концентрация азота. Важнейшими аспектами экологической безопасности при применении гидросмыва, обработанного щелочным реагентом, являются оценка его токсичности, влияние на почвенную микрофлору и продуктивность растений, а также воздействие на их рост. Целью этапа лабораторных исследований по проращиванию редиса являлось проведение биотестирования гидросмыва, обработанного реагентами, для определения степени его токсичности. В связи с тем, что подготовка гидросмыва для сельскохозяйственного использования с применением нового щелочного реагента ранее не проводилась, нами проведено биотестирование по проращиванию семян редиса на суспензии удобрения (осадок (ос.)) и в надосадочной жидкости (н/ж). В чашку Петри наливали исследуемую и чистую жидкости так, чтобы их суммарный объем не превышал 5 см³. Чашки выдерживали в термостате при температуре 20°C в течение 72 часов. Контрольные испытания проводили с чистой водой. Результаты исследований представлены в таблице 4.

За 100 % прорастания принимается контрольный образец, тогда прорастание для образцов 1с — 93 %; 2с — 100 %; 3с — 103 %; 4с — 100 %; 5с — 55 %; 6с — 96 %; 7с — 96 %; 8с — 103 %; 9с — 82 %; 10 — 27 %.

За 100 % прорастания принимается контрольный образец, тогда длина ростков для образцов 1с — 94 %; 2с — 100 %; 3с — 73 %; 4с — 58 %; 5с- 27 %; 6с — 105 %; 7с — 73 %; 8с — 61 %; 9с — 56 %; 10с — 16 %.

Таблица 4

**Результаты проведения опыта по биотестированию
(проращивание семян) надосадочной жидкости и органоминерального удобрения**

№	Состав	Количество проросших семян, шт	Средняя длина ростка, мм
0с	Контрольный образец	29	20,4
1с	20 % н/ж	27	19,3
2с	40 % н/ж	29	20,5
3с	60 % н/ж	30	15
4с	80 % н/ж	29	12
5с	100 % н/ж	16	5,7
6с	20 % ос.	28	21,4
7с	40 % ос.	28	15
8с	60 % ос.	30	12,5
9с	80 % ос.	24	11,5
10с	100 % ос.	8	3,4

Составлено автором

Критерием пригодности воды для орошения является количество и длина корней проросших семян, которое должно составлять более 70 % от контрольного образца. Анализ полученных результатов показал, что в образцах, исследуемых при соотношении жидкой фазы обработанных сточных вод свиноводческого комплекса к чистой воде 20 %, наблюдали 93 % проращение семян, причем среднее значение длины их корней составило 94 %, от контрольного опыта. Следовательно, орошение сельскохозяйственных культур жидкой фазой гидросмыва свинокомплекса, полученной после реагентной обработки, в вышеуказанном соотношении с чистой водой не оказывает негативного воздействия. Жидкая фракция сточных вод свинокомплекса в соотношениях с чистой водой, равных 40 % и 60 %, также пригодна для орошения, т. к. при таких пропорциях по сравнению с контрольным опытом проращение семян составило 100 и 103 %, а значение их длины — 100 и 73 % соответственно. Кроме того, для орошения может быть использована чистая вода с добавлением твердой фракции обработанного жидкого навоза в соотношении 20 и 40 %. Сравнивая результаты, полученные при исследованиях поведения семян редиса в такой среде, с контрольными, получили проращение в 96 % случаев, а отношение длин корней — 105 и 73 % соответственно.

Можно сделать вывод о непригодности для орошения сельскохозяйственных культур без разбавления как жидкой, так и твердой фракцией сточных вод свинокомплекса, т. к. количество проросших семян в этих случаях составило 55 % для жидкой и 27 % для твердой фаз, а длина корней — 27 и 16 % соответственно от контрольного. Процентные отношения проросших семян, а также длина их корней при биотестировании в соотношении с чистой водой жидкой фазы сточных вод — 80 % и твердой фазы — 60 и 80 % имеют значения менее 70 %, следовательно не пригодны для орошения, т. к. оказывают ингибирующее воздействие на рост растений.

Накопленный отечественный и зарубежный опыт свидетельствует об экономической целесообразности сельскохозяйственной утилизации гидросмыва свинокомплекса. Вместе с тем требуют научного обоснования вопросы эффективного применения гидросмыва свинокомплекса в качестве удобрения при обработке реагентами.

В качестве органических удобрений испытывали осадок после обработки гидросмыва свинокомплекса и надосадочная жидкость в разных концентрациях. В торфяные горшки с грунтом по 100 г. поместили по 30 семян редиса красного круглого с белым кончиком. Испытания проводили в пяти повторениях, из которых находили средние значения. В каждый горшок наливали исследуемую жидкость в концентрациях 20, 40, 60, 80, 100 %, для осадка и надосадочной жидкости в объеме 50 см³. Исследование проходило при комнатной температуре в течение 120 часов (рис. 3).

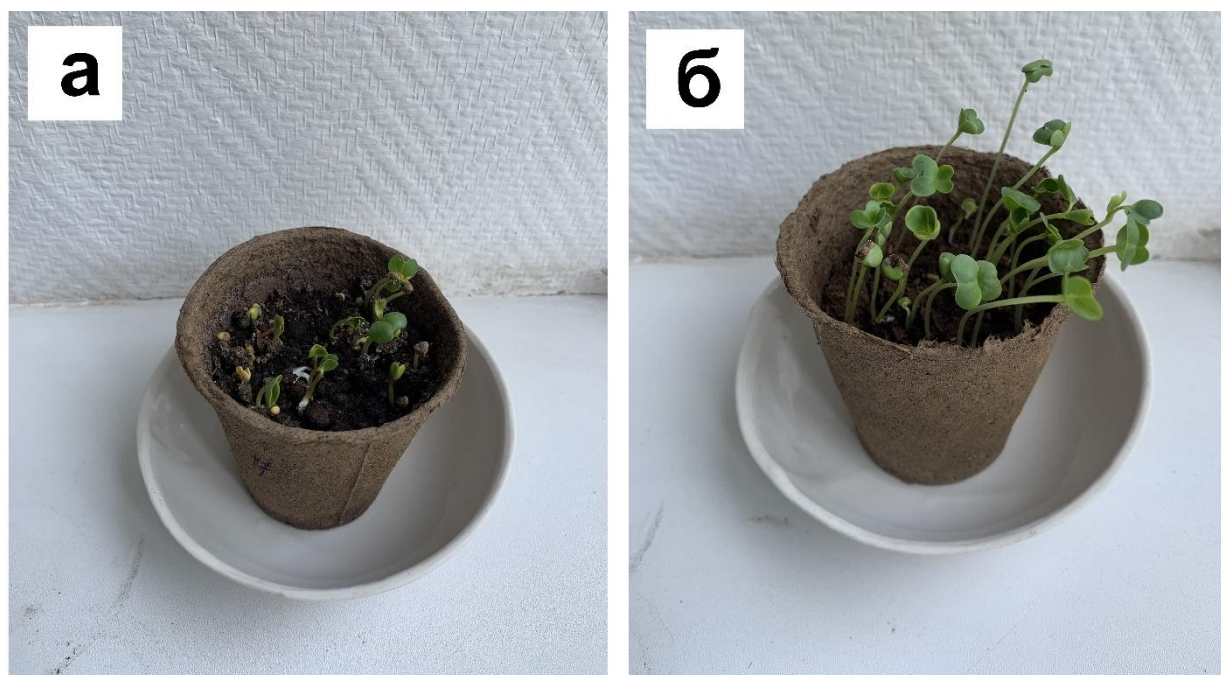


Рисунок 3. Эксперимент по всхожести семян редиса:
а — 100 %; б — 20 % надосадочной жидкости (фото автора)

Контрольные испытания проводили с чистой водой. Результаты исследований представлены в таблице 5.

За 100 % прорастания принимается контрольный образец, тогда количество проросших семян в грунте для образцов 1 — 116 %; 2 — 112 %; 3 — 100 %; 4 — 120 %; 5 — 48 %; 6 — 112 %; 7 — 116 %; 8 — 120 %; 9 — 108 %; 10 — 104 %.

За 100 % прорастания принимается контрольный образец, тогда длина ростков растений в грунте для образцов 1 — 77 %; 2 — 75 %; 3 — 38 %; 4 — 21 %; 5 — 10 %; 6 — 96 %; 7 — 87 %; 8 — 87 %; 9 — 55 %; 10 — 46 %.

Таблица 5

**Результаты проведения опыта по
биотестированию удобрения и надосадочной жидкости в грунте**

№	Состав	Количество проросших семян, шт.	Средняя длина ростка, мм	pH
0р	Контрольный образец	25	124,7	6,5
1р	20 % н/ж	29	96,2	6,5
2р	40 % н/ж	28	94,4	6,5
3р	60 % н/ж	27	48,2	6,5
4р	80 % н/ж	30	26,6	6,5
5р	100 % н/ж	12	12,4	7
6р	20 % ос.	28	119,5	6,5
7р	40 % ос.	29	108,4	6,5
8р	60 % ос.	30	108,8	6,5
9р	80 % ос.	27	69,4	6,5
10р	100 % ос.	26	58,2	7

Составлено автором

Критерий пригодности воды для полива — длина и число проростков семян свыше 70 % относительно контроля. Исследование показало, что растворы жидких отходов свиноферм в смеси с 20–40 % (масс.) чистой воды обеспечивают нормальные показатели роста семян (проростаемость — около 115 %, длина корней — порядка 75 %).

Аналогично, смесь чистой воды с органоминеральным удобрением (до 60 %) подходит для полива (проращивание семян достигает 120 %, длина корней — около 90 %). Однако неразбавленное удобрение негативно влияет на растения: при содержании 60–80 % раствора жидкости и 80 % твёрдых компонентов семена прорастают лишь на 48 % для жидкой фракции, но 104 % для твердой, а длина корней составляет всего 10–46 %. Таким образом, полученные продукты требуют обязательного разбавления перед использованием для полива сельхозкультур.

2. Результаты

Полученное органоминеральное удобрение было подвергнуто всестороннему исследованию для установления его состава и агрономелиоративной ценности. Осадок, полученный после обработки свиноводческих стоков модифицированным фосфогипсом, содержит до 90,8 % органических веществ и значительные концентрации биогенных элементов (N — 2,3 %, P — 7,8 %, K — 0,25 %), при этом содержание токсичных металлов не превышает нормативов. Биотестирование на семенах редиса показало, что как надосадочная жидкость, так и осадок требуют обязательного разбавления (до 40–60 % и до 60 % соответственно) для предотвращения токсического эффекта. Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность совместной переработки фосфогипса и свиноводческих стоков с получением ценных органоминеральных продуктов, пригодных для дальнейшего использования после корректировки концентрации.

Вывод

Для описания многофакторного эксперимента, где варьировались концентрация удобрения, температура проращивания и частота полива, была применена статистическая модель, продемонстрировавшая удовлетворительную адекватность опытным данным. Изучение свойств органоминерального состава, созданного на основе подщелачивающего реагента из фосфогипса, позволило сделать ряд выводов. В первую очередь, результаты биотестирования указывают на отсутствие токсичности. Семена растений и почва не проявляли признаков угнетения при контакте с разбавленными надосадочными жидкостями и вносимым осадком. Данный факт создаёт научное обоснование для экологически безопасной технологии переработки гидросмыва свиного комплекса, конечным продуктом которой является органоминеральное удобрение. Биотест по оценке воздействия на растения показал, что жидкая и твёрдая фракции удобрения, разбавленные водой в соотношениях 20 % и 40 %, не только не оказывают ингибирующего эффекта, но и стимулируют ростовые процессы. Кроме того, агрохимический анализ подтвердил, что удобрение, полученное обработкой твёрдой фракции навоза фосфогипсным реагентом, обладает высокой питательной ценностью. Таким образом, разработанная технология подготовки органоминерального удобрения характеризуется экологической безопасностью, а конечный продукт представляет значительную агрономелиоративную ценность.

ЛИТЕРАТУРА

1. García Becerra, F.Y. Alkaline extraction of wastewater activated sludge biosolids / F.Y. García Becerra, E.J. Acosta, D.G. Allen — DOI 10.1016/j.biortech.2010.04.021. // Bioresource Technology. — 2010. — Т. 101, № 18. — С. 6972–6980.
2. Saxena, S. Transforming waste into wealth: Leveraging nanotechnology for recycling agricultural byproducts into value-added products / S. Saxena, M.P. Mharil, P.V. Jadhav [et al.] — DOI 10.1016/j.plana.2024.100127 // Plant Nano Biology. — 2025. — Т. 11. — С. 100127.

3. Ammar, R. Role of phosphogypsum and NPK amendments on the retention or leaching of metals in different soils / R. Ammar, H.J. Kanbar, V. Kazpard [et al.] — DOI 10.1016/j.jenvman.2016.04.042 // Journal of Environmental Management. — 2016. — Т. 178. — С. 2–29.
4. Li, J. Research progress on the application of natural adsorbents in the treatment of livestock wastewater / J. Li, Y. Liu, J. Wang, Y. Liu, M. Zhang, L. Zhao, S. Gu, R. Lin, L. Chen — DOI 10.5772/intechopen.68253 // Desalination and Water Treatment. — 2024. — Т. 317. — С. 100018.
5. Suresh, S. Combination of alkalinity and porosity enhances formaldehyde adsorption on pig manure-derived composite adsorbents / S. Suresh, K. Kante, E.H. Fini, T.J. Badosz — DOI 10.1016/j.micromeso.2019.05.034 // Microporous and Mesoporous Materials. — 2019. — Т. 286. — С. 155–162.
6. Deng, L. Treatment and utilization of swine wastewater — A review on technologies in full-scale application / L. Deng, D. Zheng, J. Zhang, H. Yang, L. Wang, W. Wang, T. He, Y. Zhang — DOI 10.1016/j.scitotenv.2023.163223 // Science of The Total Environment. — 2023. — Т. 880. — С. 163223..
7. Sustainability Portal. Ecological and environmental problems, solutions and best practices // Современные технологии и оборудование для переработки и утилизации навоза КРС. — 2019. — DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-4-32-37.
8. Yuan, P. Thermodynamic properties and reaction mechanism of coal reductive decomposition phosphogypsum to prepare CaO and SO₂ / P. Yuan, M. Li, S. Chen, W. Xiang — DOI 10.1016/j.cherd.2011.03.016 // Chinese Journal of Chemical Engineering. — 2025. — Т. 79. — С. 135–144.
9. Домашенко, Ю.Е. Экологическое и технологическое обоснование подготовки животноводческих стоков хозяйств по выращиванию крупного рогатого скота / Ю.Е. Домашенко // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. — 2018. — № 51. — С. 114–118. — EDN SUNHYW.
10. Колесникова, Т.А. Способ подготовки жидких отходов свиногокомплексов для сельскохозяйственного использования: пат. 2737102 С1 Рос. Федерация: МПК C02F 1/52 / Т.А. Колесникова, М.А. Куликова, Е.А. Грибут, О.А. Суржко; заявитель и патентообладатель Южно-Рос. гос. политехн. ун-т имени М.И. Платова. — № 2020105082; заявл. 11.02.2020; опубл. 24.11.2020. — 7 с. — EDN YDRANN.
11. Wu, F. Utilization path of bulk industrial solid waste: A review on the multi-directional resource utilization path of phosphogypsum / F. Wu, Y. Ren, G. Qu, S. Liu, B. Chen, X. Liu, C. Zhao, J. Li — DOI 10.1016/j.jenvman.2022.114957 // Journal of Environmental Management. — 2022. — Т. 313. — С. 114957.
12. Wang, Z. Investigating effects of phosphogypsum disposal practices on the environmental performance of phosphate fertilizer production using emergy analysis and carbon emission amounting: A case study from China / Z. Wang, X. Ma, H. Pan, X. Yang, X. Zhang, Y. Lyu, W. Liao, W. Shui, J. Wu, M. Xu, Y. Zhang, S. Zhang, Y. Xiao, H. Luo — DOI 10.1016/j.jclepro.2023.137248 // Journal of Cleaner Production. — 2023. — Т. 409. — С. 137248.
13. Федорченко, М.А. Способ подготовки сточных вод свиногокомплексов и свиноферм для сельскохозяйственного использования: пат. 2242444 С1 Рос. Федерация: МПК C02F 1/58, C05F 3/00 / М.А. Федорченко, О.А. Суржко; заявитель и патентообладатель Южно-Рос. гос. техн. ун-т (Новочеркасский политехн. ин-т). — № 2004122049; заявл. 20.07.2004; опубл. 20.12.2004. — 5 с. — EDN JMNAPH.

14. Tsioka, M. Comparison of alternative management methods for phosphogypsum waste using life cycle analysis / M. Tsioka, E.A. Voudrias — DOI 10.1016/j.jclepro.2020.121386. // Journal of Cleaner Production. — 2020. — Т. 266. — С. 121386.
15. Монастырский, Д.И. Эффективность синтезированных щелочных реагентов для очистки сточных вод / Д.И. Монастырский, М.А. Куликова // Вестник Евразийской науки. — 2025. — Т. 17, № 3. — С. 1–10. — URL: <https://esj.today/PDF/53NZVN325.pdf> (дата обращения: 02.02.2026).

Monastyrsky Daniil Ivanovich

Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

E-mail: danya.monastyrskij.95@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6323-8073>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1177297

Kulikova Marina Anatolievna

Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

E-mail: my7rysyk@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4000-0040>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=667087

Environmental safety of organomineral fertilizers from pig farm hydrowash and reconstituted phosphogypsum

Abstract. The present study focuses on the issue of neutralization of multicomponent liquid waste (hydraulic washing) generated during the activities of pig breeding complexes. The paper proposes and studies a method for correcting these media using phosphogypsum subjected to thermal modification by the reduction method. The main purpose of the work was a comprehensive assessment of the agrochemical parameters and the degree of environmental safety of the solid sediment and liquid phase formed as a result of the treatment of model wastewater with modified phosphogypsum. As part of the research, a detailed analysis of the physico-chemical properties and the elemental structure of the resulting sediment was carried out. The data obtained indicate a high content of the organic component in it (up to 90,8 %) and significant concentrations of key nutrients: total nitrogen (2,3 %), phosphorus (7,8 %) and potassium (0,25 %). Biotesting using radish seeds was carried out to determine the toxic potential and possible stimulating effect of processed products. Optimization of the evaluation conditions was achieved through the use of the experimental planning method, namely the simplex-lattice plan, which made it possible to analyze and simulate the cumulative effect of three independent factors: the concentration of the applied drug, temperature and humidification regime on seed germination and linear growth of seedlings.

The analysis of the experimental results demonstrates the need for mandatory dilution of both liquid and solid fractions before their potential use. Dilution ranges that are environmentally safe and have growth-stimulating activity have been established: 40–60 % for the filler liquid, and up to 60 % for solid sludge. The technological approach being developed is aimed at simultaneously solving two significant environmental problems: the disposal of livestock waste and the involvement of secondary raw materials of the chemical industry in the resource cycle.

Keywords: hydraulic washing of the pig complex; phosphogypsum; organomineral fertilizer; biotesting; environmental safety; waste disposal