

ВЫБОР ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ СОВМЕСТНОГО ГРАНУЛИРОВАНИЯ С ЖИДКИМИ ТЕХНОГЕННЫМИ ОТХОДАМИ МЕТОДОМ ОКАТЫВАНИЯ

Крисанова В.А., Липин А.А., Липин А.Г.

Крисанова Виктория Андреевна, Липин Андрей Александрович, Липин Александр Геннадьевич
Ивановский государственный химико-технологический университет,
г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7
E-mail: krisanova_va@mail.ru, lipin.a@mail.ru, 157lipin@mail.ru

Утилизация жидких техногенных отходов возможна методом гранулирования с последующим капсулированием полученных гранул в непроницаемую оболочку. В статье представлены результаты исследований процесса гранулирования методом окатывания, когда каркас гранулы состоит из дисперсного материала, а жидкий отход используется в качестве связующего вещества. Решалась задача правильного выбора дисперсного материала. Для этой цели тестировались зола, строительный гипс – алебастр, известковая мука, а также смеси этих веществ в различном массовом соотношении. Жидким отходом являлся концентрированный раствор солей. Изучено влияние состава гранул на их форму, качество поверхности, размер и статическую прочность. Установлено, что наибольшее значение статической прочности имеют гранулы, полученные из смеси известковой муки с гипсом, а зола, гипс и известковая мука по отдельности дают непрочные гранулы. Кроме того, выявлено, что с увеличением размера частиц одного состава их прочность увеличивается. Проведённые эксперименты позволили рекомендовать следующие составы дисперсных материалов: смесь известковой муки и гипса в массовом соотношении 1,5:1, смеси известковой муки и золы, а также золы и гипса в массовых соотношениях 1:1.

Ключевые слова: гранулирование, тарельчатый гранулятор, утилизация, жидкие отходы, гранулометрический состав, статическая прочность.

SELECTION OF DISPERSED MATERIAL FOR CO-GRANULATION WITH LIQUID INDUSTRIAL WASTE BY PELLETIZING

Krisanova V.A., Lipin A.A., Lipin A.G.

Krisanova Victoria Andreevna, Lipin Andrey Alexandrovich, Lipin Alexander Gennadievich
Ivanovo State University of Chemistry and Technology,
Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7
E-mail: krisanova_va@mail.ru, lipin.a@mail.ru, 157lipin@mail.ru

The disposal of liquid industrial waste is possible by granulation, followed by encapsulation of the resulting granules in an impermeable shell. The paper presents the results of the pelletizing process research, where the granule frame consists of a dispersed material and liquid waste is used as a binder. The problem of correctly choosing the dispersed material was solved. For these purpose, ash, gypsum – alabaster, lime flour, as well as mixtures of these substances in various mass ratios, were tested. The liquid waste was a concentrated solution of salts. The effect of the granule composition on their shape, surface quality, size, and static strength has been studied. It has been established that the granules with the highest static strength are obtained from a mixture of lime flour and gypsum, while ash, gypsum, and lime flour individually produce weak granules. In addition, it has been found that as the particle size of a given composition increases, its strength also increases. The experiments made it possible to recommend the following compositions of dispersed materials: a mixture of lime flour and gypsum in a mass ratio of 1.5:1, mixtures of lime flour and ash, as well as ash and gypsum in a mass ratio of 1:1.

Keywords: granulation, pan granulator, disposal, liquid waste, granulometric composition, static strength.

Для цитирования:

Крисанова В.А., Липин А.А., Липин А.Г. Выбор дисперсного материала для совместного гранулирования с жидкими техногенными отходами методом окатывания. *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*. 2026. № 1. С. 142-149. DOI: 10.6060/snt.20268501.00017

For citation:

Krisanova V.A., Lipin A.A., Lipin A.G. Selection of dispersed material for joint granulation with liquid man-made waste by the pelletizing method. *Modern high technology. Regional application*. 2026. N 1. P. 142-149. DOI: 10.6060/snt.20268501.00017

ВВЕДЕНИЕ

Экологические проблемы являются одним из приоритетных направлений устойчивого развития современного общества. Одним из наиболее острых вопросов остается проблема образования жидких токсичных техногенных отходов и их последующая утилизация [1-5].

Эти отходы образуются в технологических процессах очистки сточных вод предприятий химической, нефтехимической, металлургической отраслей, а также фильтрационных вод полигонов твердых коммунальных отходов [6]. Жидкие отходы представляют собой концентрированные растворы солей, например, после установок обратного осмоса, смолянистые остатки, накапливающиеся в скрубберах, отстойниках и т.п. Высокая концентрация токсичных компонентов в отходах создает серьезные риски для здоровья человека и состояния экосистем [7, 8]. Особенную опасность представляют соединения тяжелых металлов, накапливающиеся в концентратах.

Утилизация жидких токсичных растворов представляет серьёзную задачу из-за сложности разделения компонентов, их высокой концентрации и значительных экономических затрат. Традиционные подходы к утилизации включают сжигание, физико-химические методы, такие как нейтрализация, окисление, восстановление, а также захоронение [9]. Однако эти способы имеют существенные ограничения и недостаточную эффективность, часто приводящие к вторичному загрязнению природы. В работе [10] предложен высокоэффективный подход по переработке смолоподобного жидкого отхода в водородосодержащий газ путем его пиролиза в среде газа элюента под действием микроволнового излучения. Однако такой подход ресурсо- и энергозатратен. Поэтому проблема энергоэффективной и безопасной утилизации жидких токсичных отходов остаётся актуальной и требует дальнейшего изучения [11].

В качестве перспективного способа предлагается капсулирование в непроницаемую оболочку, имеющее ряд преимуществ: исключение вторичного загрязнения, сохранение стабильности при различных условиях среды, возможность

безопасной транспортировки и хранения. Этот способ позволяет не только утилизировать отходы, но и снизить токсичность.

Для капсулирования жидких токсичных отходов в качестве промежуточной стадии предполагается использование метода гранулирования. Гранулирование представляет собой процесс формирования твердых частиц из порошкообразных или мелкозернистых материалов путём перемешивания исходного материала с добавлением связующих агентов [12, 13].

Данный метод широко используется в различных отраслях промышленности благодаря простоте оборудования, невысокой стоимости, универсальности и повышению механической прочности гранул [14].

Для формирования частиц в процессе гранулирования жидкий отход смешивается с твердым отходом, либо иным дешевым и доступным дисперсным материалов. При этом жидкий компонент выступает в роли связующего при гранулировании твердого [15].

Такое решение позволит одновременно утилизировать твердые и жидкие отходы. В то же время выбор твердого дисперсного материала для совместного гранулирования с жидким отходом является актуальной задачей. Необходимо подобрать твердый дисперсный материал таким образом, чтобы получаемые из него гранулы удовлетворяли требуемому размеру и были достаточно прочными для дальнейшего капсулирования.

Цель настоящего исследования заключается в выборе дисперсного материала для его гранулирования совместно с жидкими токсичными отходами методом окатывания и оценке физико-механических свойств полученных гранул.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве дисперсных материалов для гранулирования тестировались зола, строительный гипс – алебастр, известковая мука. Жидкое связующее представляло собой модельный водный раствор солей NaCl и Na₂SO₄ с общим солевым содержанием 28 %. Гранулирование осуществлялось в лабораторной установке, схема которой показана на рис. 1.

Основным аппаратом установки является тарельчатый гранулятор с диаметром тарели 200 мм и высотой борта 68 мм. Методика эксперимента заключалась в следующем. Навеска сыпучего компонента загружалась в нижнюю часть тарели гранулятора 1. Затем включался электродвигатель 4, вращающий тарель гранулятора.

Скорость вращения тарели составляла 40 об/мин, угол наклона тарели 40°. Солевой раствор, используемый в роли связующего, заливался в емкость 7 и с помощью перистальтического насоса-дозатора 6 подавался через механическую форсунку 10 в верхнюю часть тарели на поднимающийся слой сыпучего компонента.

Для предотвращения налипания материала на стенки тарели в ней был установлен скребок 2. Расход связующего составлял 1,2 мл/мин. Образующиеся агломераты сыпучего компонента поднимались по ходу вращения тарели и затем под воздействием силы тяжести катились вниз по

слою введенного, ещё не агломерированного сыпучего материала. Таким образом, материал «окапывался» в гранулы послойно и постепенно уплотнялся. Гранулирование велось при постоянном обогреве от ИК-излучателя 8. Полученные гранулы выгружались из аппарата и подвергались анализу на гранулометрический состав и прочность. В опытах варьировался состав гранул. Нумерация опытов, состав и массовое соотношение компонентов приведены в табл. 1.

Определение гранулометрического состава гранулята осуществлялось методом ситового анализа. Материал загружался на сито с ячейками диаметром 10 мм и путем встряхивания и вибрации разделялся на две части – остаток и проход.

Остаток собирался в емкость и взвешивался, а проход из поддона помещался на следующее сито в порядке уменьшения размера ячеек (9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2 мм), и просев продолжался описанным способом

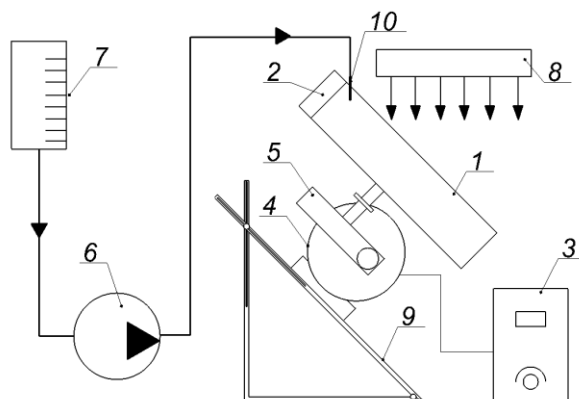


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – тарельчатый гранулятор; 2 – скребок; 3 – регулятор скорости вращения тарели; 4 – электродвигатель; 5 – редуктор; 6 – перистальтический насос; 7 – емкость для растворов связующего; 8 – источник ИК-излучения; 9 – устройство для регулирования угла наклона тарели; 10 – форсунка
Fig. 1. Experimental setup diagram: 1 – pan granulator; 2 – scraper; 3 – rotary speed controller; 4 – electric motor; 5 – reducer; 6 – peristaltic pump; 7 – tank for binder solutions; 8 – IR-radiation source; 9 – device for adjusting the pan angle; 10 – nozzle

Таблица 1

Состав и нумерация образцов гранул
Table 1. Composition and numbering of granule samples

№ опыта	Состав	Массовое соотношение компонентов
1	Зола	-
2	Гипс	-
3	Известковая мука	-
4	Известковая мука + гипс	1,5:1
5	Зола + гипс	1:1
6	Зола + гипс	2:1
7	Зола + известковая мука	1:1
8	Зола + известковая мука	2:1

После окончания просева каждая фракция с соответствующего сита и поддона взвешивалась на весах. Гранулы крупнее 10 мм измерялись вручную с помощью штангенциркуля.

Определение статической прочности гранул осуществлялось с помощью прибора-измерителя прочности гранул ИПГ-1М. Для получения значений статической прочности гранул в каждой опытной серии было отобрано по 10 гранул, определено усилие, необходимое для их разрушения, и рассчитано среднее значение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в ходе экспериментов образцы гранул показаны на рис. 2. Нумерация образцов соответствует принятой в табл. 1. Наиболее гладкая поверхность наблюдается у образцов, полученных из смеси золы и гипса (№5 и 6). Гранулы из известковой муки получились шероховатыми (образец №3), что обусловлено размером исходных частиц. При смешивании известковой муки с гипсом (образец №4) и золой (№7 и 8) шероховатость гранул существенно уменьшилась.



Рис. 2. Внешний вид образцов гранул
Fig. 2. Granule samples

На рис. 3-6 представлены гистограммы распределения частиц по размерам в опытных образцах. Поскольку гранулы были шарообразной формы, либо близкой к ней, то под размером гранул понимается их диаметр. Средний диаметр гранул, полученных из золы (опыт №1), составил 4,32 мм. Ширина спектра размеров в этом опыте составила 2-8 мм, характер распределения мономодальный с пиком для фракции 4-5 мм (рис. 3). 88 % гранул находятся в диапазоне размеров 3-6 мм. Для гранул, полученных из гипса (опыт №2), ширина спектра размеров составила 2-10 мм, характер распределения бимодальный с пиками для фракций 2-3 мм и 4-5 мм (рис. 3). Средний размер составил 4,07 мм, но 90 % гранул находятся в диапазоне размеров 2-9 мм. В опыте №3 гранулят был получен из известковой муки. Ширина спектра размеров гранул в этом опыте составила 1-16 мм (рис. 4), что говорит о высокой полидисперсности гранулята. Порядка 60 % гранул были крупнее 10 мм в диаметре, размер 33 % гранул

находился в диапазоне 2-8 мм. Средний размер составил 6,08 мм. В опыте №4 гранулят был получен из смеси известковой муки и гипса, взятых в массовом соотношении 1,5:1. Ширина спектра размеров гранул в этом опыте составила 3-12 мм (рис. 3), а средний размер – 6,74 мм. Характер распределения бимодальный с пиками для фракций 5-6 мм и 7-8 мм. Порядка 90 % гранул относятся к фракциям с размерами 4-10 мм.

Смеси золы с известковой мукой тестировались в опытах №7 и 8. В опыте №7 зола с известковой мукой смешивались в соотношении 1:1, а в опыте №8 в соотношении 2:1. Размеры гранул в опыте №7 варьируются от 2 до 12 мм, а в опыте №8 от 3 до 12 мм (рис. 6). Ярко выраженные пики наблюдаются в обоих опытах для фракций 5-6 мм и 7-8 мм. Средний диаметр гранул составил 5,86 мм для опыта №7 и 7,31 мм для опыта №8. Порядка 90 % гранул в опыте №7 принадлежат фракциям с размерами 2-9 мм, а в опыте №8 – фракциям с размерами 5-11 мм.

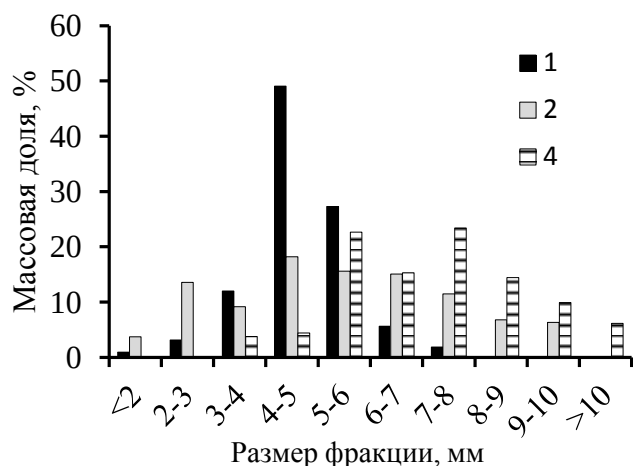


Рис. 3. Гранулометрический состав продукта грануляции для опытов № 1, 2, 4
Fig. 3. Granulometric composition of the granulation product for experiments N 1, 2, 4

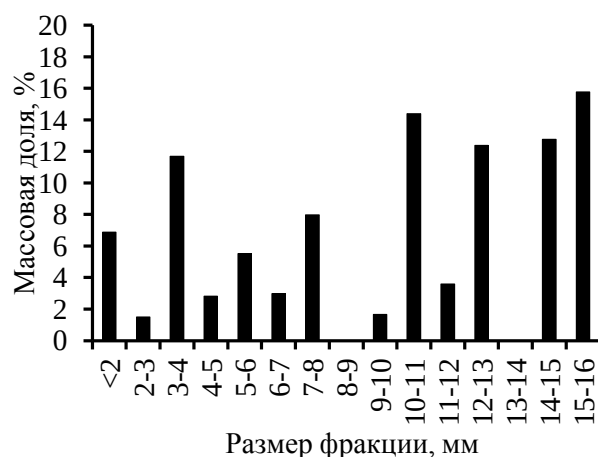


Рис. 4. Гранулометрический состав продукта грануляции для опыта № 3
Fig. 4. Granulometric composition of the granulation product for experiment N 3

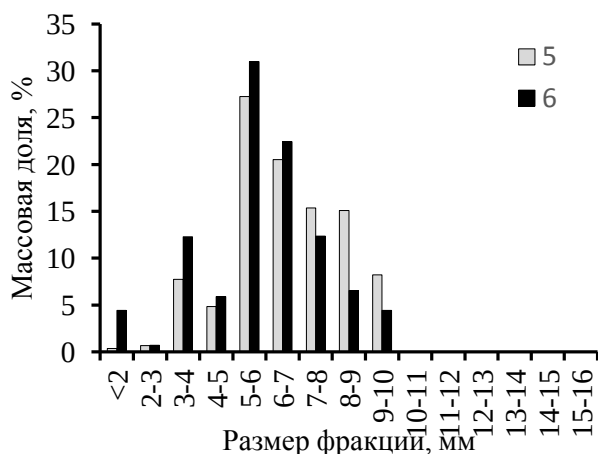


Рис. 5. Гранулометрический состав продукта грануляции для опытов № 5 и 6
Fig. 5. Granulometric composition of the granulation product for experiments N 5 and 6

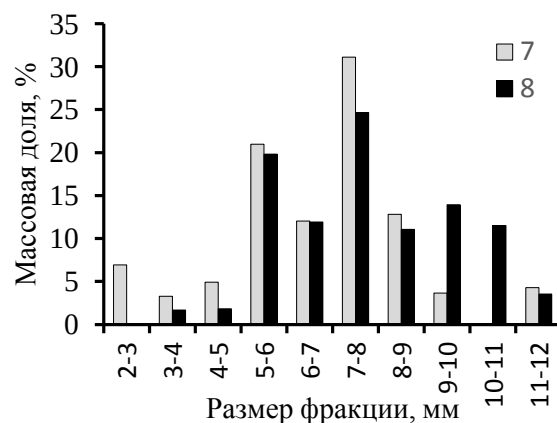


Рис. 6. Гранулометрический состав продукта грануляции для опытов № 7 и 8
Fig. 6. Granulometric composition of the granulation product for experiments N 7 and 8

Таблица 2

Характеристика образцов гранул
Characteristics of granule samples

№ образца	Средний размер, мм	Статическая прочность, Н
1	4,32	-
2	4,07	10
3	6,08	16
4	6,74	40
5	6,14	25
6	4,69	-
7	5,86	32
8	7,31	22

В опытах №5 и 6 в качестве дисперсного материала для формирования гранул использовались смеси золы и гипса. В опыте №5 зола и гипс смешивались в равном количестве, а в опыте №6 количество золы превышало количество гипса

вдвое. Ширина спектра размеров в обоих опытах составила 1-10 мм, характер распределения бимодальный с пиками для фракций 3-4 мм и 5-6 мм (рис. 5). Средний диаметр гранул составил 6,14 мм для опыта №5 и 4,69 мм для опыта №6.

В обоих опытах 90 % гранул принадлежат фракциям с размерами 3-9 мм. Средние размеры гранул для всех восьми опытов приведены в табл. 2. Наибольшее значение среднего диаметра наблюдается у гранул из золы и известковой муки, смешанных в соотношении 2:1 (опыт №8), а наименьшее – у гранул из гипса (опыт №2).

Для всех образцов была отобрана фракция с размерами гранул 5-7 мм, гранулы этой фракции подвергались анализу на прочность. Значения статической прочности для всех опытов приведены в табл. 2. Прочерк означает, что прочность была ниже порога чувствительности прибора.

Прочность гранул, полученных из смесей веществ (опыты № 4-8 за исключением опыта №6), выше чем гранул, полученных из индивидуальных веществ (опыты №1-3). Наибольшую прочность показали гранулы из смеси известковой муки и гипса в соотношении 1,5:1 (опыт №4).

На втором месте по прочности находятся гранулы из смеси золы и известковой муки в соотношении 1:1 (опыт №7).

Очевидно, что добавление известковой муки в состав смесей делает гранулы более прочными. Образцы, полученные на основе золы (опыт №1) и смеси золы с гипсом в массовом соотношении 2:1 (опыт №6), оказались непрочными, под прессом они легко раздавливались, и прибор не фиксировал предельную нагрузку.

Минимальная зафиксированная нагрузка была у образца из гипса – 10 Н. У образцов № 5 и № 7 статическая прочность была измерена для трех фракций разного размера. Полученные данные представлены на рис. 7.

С увеличением размера гранул возрастает их прочность, что подтверждается данными для двух образцов разного состава.

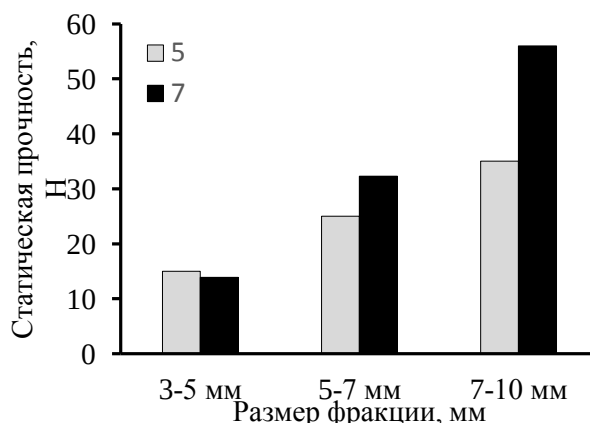


Рис. 7. Зависимость прочности гранул от их размера для опытов №5 и №7
Fig. 7. Dependence of granule strength on their size for experiments N 5 and N 7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе методом гранулирования в тарельчатом грануляторе получены образцы гранул из различных дисперсных материалов: золы, гипса, известковой муки. В качестве связующего компонента при гранулировании использовался жидкий техногенный отход, представляющий собой концентрат солей. Анализ гранулометрического состава полученных гранул показал, что для всех образцов характерна полидисперсность.

Наиболее узкий разброс размеров наблюдался для гранулята, полученного из золы, а наиболее широкий – для гранул, полученных из известковой муки. Для гранулята из гипса, смеси известковой муки с гипсом, смеси золы с гипсом характерно бимодальное распределение гранул по размерам.

Средний диаметр гранул во всех опытах отличался и варьируется в диапазоне от 4,07 мм до 7,31 мм. Анализ полученных гранул на прочность показал, что наибольшую статическую прочность имеют гранулы из известковой муки с добавлением гипса, на втором месте по прочности находятся гранулы из известковой муки и золы, смешанных в равных долях.

Увеличение доли золы в исходной смеси отрицательно сказывается на прочности гранул. Гранулы из индивидуальных веществ показали низкую прочность.

Для последующего капсулирования гранул важное значение имеют их форма и поверхность. Гранулы округлой формы с гладкой поверхностью без сколов, трещин и раковин лучшего всего подходят для капсулирования.

Наиболее гладкая поверхность наблюдалась у образцов, полученных из смеси золы и гипса, на втором месте по качеству поверхности находятся частицы из известковой муки и гипса.

Таким образом, для утилизации жидких техногенных отходов типа солевых концентратов методом гранулирования с последующим капсулированием можно рекомендовать следующие составы дисперсных материалов: смесь известковой муки и гипса в массовом соотношении 1,5:1, смеси известковой муки и золы, а также золы и гипса в массовых соотношениях 1:1.

Полученные в ходе выполнения работы данные могут быть использованы при гранулировании катализаторных масс методом окатывания.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение НИР (Тема № FZZW-2024-0004). В работе использовано оборудование Центра коллективного пользования Ивановского государственного химико-технологического университета (г. Иваново, Россия).

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang S., Yu L., Zhang Y., Liu Q., Xia J., Tian J., Zhang H., Lu X. Removal of anionic dyes from wastewater using fly ash based adsorbent. *Desalination and Water Treatment*. 2024. V. 317. 100007. DOI:10.1016/j.dwt.2024.100007.
2. Pattanaik L., Duraivadivel P., Hariprasad P., Narayan S. N. Utilization and re-use of solid and liquid waste generated from the natural indigo dye production process. *A zero waste approach. Bioresource Technology*. 2020. V. 301. 122721. DOI:10.1016/j.biortech.2019.122721.
3. Lim S.-H., Lee S.-H., Song J.-S., Kim K.-H. A study on the roll compaction of dry concentrated waste liquid for disposal. *Annals of Nuclear Energy*. 2024. V. 20. 110402. DOI:10.1016/j.anucene.2024.110402.
4. Dereli B., Gürel B., Dolgun G.K., Keçebas A. Comprehensive study on incineration-based disposal of hazardous gas and liquid wastes from used lubricating oil refineries. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. V. 184. P. 79-95. DOI:10.1016/j.psep.2024.01.077.
5. Shon J.-S., Lee H.-K., Kim T.-J., Kim G.-Y., Jeon H. Evaluation of cementation of intermediate level liquid waste produced from fission 99Mo production process and disposal feasibility of cement waste form. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. V. 54(9) P. 3235-3241. DOI:10.1016/j.net.2022.03.033.
6. Драгин В.С., Лутченко Е.Л., Белов П.С., Чориева А.А. Утилизация твердых отходов. *International Journal of Professional Science*. 2025. № 9-2. С. 26-30.
7. Поворов А.А., Ильина М.Е., Селиванов О.Г., Курочкин И.Н. Оценка эффективности мембранного разделения высококонцентрированных фильтрационных вод полигона ТБО на двухступенчатой установке обратного осмоса. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2021. № 6. С. 142-155. DOI:10.35567/1999-4508-2021-6-8.
8. Протасова Н.М., Поворов А.А., Липин А.А., Липин А.Г. Исследование сорбции ионов аммония на смешанном слое ионитов в статических условиях. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2025. № 4. С. 137-142. DOI:10.6060/snt.20258404.00018.
9. Иванов А.С. Способы утилизации золы, полученной в результате сжигания растительных отходов сельского хозяйства. *Мир Инноваций*. 2024. № 2(29). С. 3-8.

REFERENCES

1. Zhang S., Yu L., Zhang Y., Liu Q., Xia J., Tian J., Zhang H., Lu X. Removal of anionic dyes from wastewater using fly ash based adsorbent. *Desalination and Water Treatment*. 2024. V. 317. 100007. DOI:10.1016/j.dwt.2024.100007.
2. Pattanaik L., Duraivadivel P., Hariprasad P., Narayan S. N. Utilization and re-use of solid and liquid waste generated from the natural indigo dye production process. *A zero waste approach. Bioresource Technology*. 2020. V. 301. 122721. DOI:10.1016/j.biortech.2019.122721.
3. Lim S.-H., Lee S.-H., Song J.-S., Kim K.-H. A study on the roll compaction of dry concentrated waste liquid for disposal. *Annals of Nuclear Energy*. 2024. V. 20. 110402. DOI:10.1016/j.anucene.2024.110402.
4. Dereli B., Gürel B., Dolgun G.K., Keçebas A. Comprehensive study on incineration-based disposal of hazardous gas and liquid wastes from used lubricating oil refineries. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. V. 184. P. 79-95. DOI:10.1016/j.psep.2024.01.077.
5. Shon J.-S., Lee H.-K., Kim T.-J., Kim G.-Y., Jeon H. Evaluation of cementation of intermediate level liquid waste produced from fission 99Mo production process and disposal feasibility of cement waste form. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022. V. 54(9) P. 3235-3241. DOI:10.1016/j.net.2022.03.033.
6. Dragin V.S., Lutchenko E.L., Belov P.S., Chorieva A.A. Solid waste disposal. *International Journal of Professional Science*. 2025. N 9-2. P. 26-30.
7. Povorov A.A., Ilyina M.E., Selivanov O.G., Kurochkin I.N. Evaluation of the efficiency of membrane separation of highly concentrated filtration waters of a solid waste landfill at a two-stage reverse osmosis plant. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. N 6. P. 142-155. DOI:10.35567/1999-4508-2021-6-8.
8. Protasova N.M., Povorov A.A., Lipin A.A., Lipin A.G. Study of sorption of ammonium ions on a mixed layer of ion exchangers under static conditions. *Modern high technology. Regional application*. 2025. N 4. P. 137-142. DOI:10.6060/snt.20258404.00018.
9. Ivanov A.S. Methods for recycling ash obtained from combustion agricultural plant waste. *World of innovation*. 2024. N 2(29). P. 3-8.

10. **Максимова Н.Д., Чистяков А.В., Бобкова Е.С.** Пиролиз жидкого остатка, полученного в процессе утилизации отходов под действием микроволнового излучения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 12. С. 129-138. DOI:10.6060/ivkkt.20256812.7158.
11. **Кравченко А.А.** Экологическая безопасность: метод ресурсосбережения при утилизации отходов с применением инноваций. *Экономика и безопасность*. 2025. № 3. С. 203-207.
12. **Сотников В.Г., Ильясов И.Р., Сафин Р.Г.** Исследование физико-механических свойств гранул из растительного сырья. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2025. № 207. С. 348-355. DOI:10.21515/1990-4665-207-030.
13. **Смирнова О.Е., Пичугин А.П.** Технологические закономерности формирования гранулированного лигносодержащего заполнителя. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2025. № 4(796). С. 71-80. DOI:10.32683/0536-1052-2025-796-4-71-80.
14. **Стрельникова В.О., Таран Ю.А., Фуфаева В.М.** Исследование влияния режимно-технологических параметров работы тарельчатого гранулятора на качественные показатели удобрения на основе карбамида с наполнителем из фосфогипса с применением математического моделирования. *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2025. № 72. С. 66-72. DOI:10.36807/1998-9849-2025-72-98-66-72.
15. **Лебедев А.Е., Мурашов А.А., Гуданов И.С., Ватагин А.А., Долгин Д.С., Орлов Ф.С.** Выявление механизма образования гранул порошкообразных материалов при мокром гранулировании в быстроходном роторном грануляторе. *От химии к технологии шаг за шагом*. 2025. Т. 6, № 2. С. 50-56. DOI:10.52957/2782-1900-2025-6-2-50-56.
10. **Maximova N.D., Chistyakov A.V., Bobkova E.S.** Pyrolysis of liquid residue obtained in the process of waste disposal under the action of microwave radiation. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68, N 12. P. 129-138. DOI:10.6060/ ivkkt. 20256812. 7158.
11. **Kravchenko A.A.** Environmental safety: a resource-saving method for waste disposal using innovations. *Economy and security*. 2025. N 3. P. 203-207.
12. **Sotnikov V.G., Ilyasov I.R., Safin R.G.** Study of physico-mechanical properties of granules from plant raw materials. *Polythematic online scientific journal of kuban state agrarian university*. 2025. N 207. P. 348-355. DOI:10.21515/1990-4665-207-030.
13. **Smirnova O.E., Pichugin A.P.** Technological regularities of formation of granular ligno-containing aggregate. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2025. N 4(796). P. 71-80. DOI:10.32683/0536-1052-2025-796-4-71-80.
14. **Strelnikova V.O., Taran Yu.A., Fufaeva V.M.** Investigation of the regime and technological parameters of the plate granulator operation effects on the quality parameters of a carbamide-based fertilizer with a phosphogypsum filler using mathematical modeling. *Proceedings of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2025. N 72. P. 66-72. DOI:10.36807/1998-9849-2025-72-98-66-72.
15. **Lebedev A.E., Murashov A.A., Gudanov I.S., Vatagin A.A., Dolgin D.S., Orlov F.S.** Identification of the mechanism of formation of granules of powdered materials during wet granulation in a high-speed rotary granulator. *From chemistry to technology step by step*. 2025. V. 6, N 2. P. 50-56. DOI:10.52957/2782-1900-2025-6-2-50-56.

Поступила в редакцию(Received) 14.11.2025
Принята к опубликованию (Accepted) 09.02.2026