Ресурсный потенциал техногенных отходов в контексте циркулярной трансформации строительной отрасли (на примере утилизации отработанного катализатора КУ-2ФПП)

Касперавичюс Милена Витасовна
магистрант, институт инженеров строительства и транспорта, Ярославский государственный технический университет, milena.kasper@bk.ru,

Мирошниченко Игорь Юрьевич
старший преподаватель, институт инженеров строительства и транспорта, Ярославский государственный технический университет; генеральный директор, ООО «ЯрПроект», miroshnichenko_iu@yarproekt76.ru

В статье рассмотрены концептуальные подходы к интеграции принципов циркулярной экономики при производстве строительных материалов. Проведен анализ барьеров и перспектив вовлечения техногенных отходов в производственный оборот. Оценена экономическая эффективность повторного использования отработанных химических катализаторов в качестве добавок в композит-бетонную смесь при её производстве в промышленных масштабах. Обоснована возможность использования отработанного сульфокатионитового катализатора КУ-2ФПП в качестве модифицирующей добавки для бетонных композитов. Представлена детальная характеристика физико-химических свойств отработанного КУ-2ФПП. Определены технологические и конструктивные ограничения его использования в производстве композитного бетона. Обоснована необходимость и способы предварительной обработки катализатора перед введением его в смесь. Произведен оценочный анализ экономического эффекта отказа от захоронения катализатора, являющегося опасным промышленным отходом, на специализированных полигонах в пользу возможности повторного его применения в производстве.

Ключевые слова: циркулярная экономика, строительные отходы, вторичные ресурсы, отработанный катализатор КУ-2ФПП, модификация бетона, устойчивое развитие, промышленный симбиоз.

Введение

Современная экономическая модель, доминировавшая на протяжении последних двух столетий, базируется на линейном принципе «ресурс - продукт - отход». Данная парадигма, сопровождавшаяся беспрецедентным ростом промышленного производства, привела к системному экологическому дисбалансу: истощению невозобновляемых источников сырья, аккумуляции значительных объёмов твердых отходов производства и прогрессирующему загрязнению компонентов биосферы. В этом контексте строительная отрасль занимает особое положение, поскольку аккумулирует до 40-50 % всех добываемых минеральных материалов и генерирует более 30 % твёрдых промышленных отходов.

Ответом на критический рост накопления отходов строительной сферы и соответствующее пагубное воздействие их утилизации на экологию планеты стала формирующаяся в последние десятилетия концепция циркулярной экономики (экономики замкнутого цикла), постулирующая сохранение потребительской ценности ресурсов на максимально длительном временном интервале и минимизацию образования отходов, принципах оборачиваемости материальных ресурсов. В отличие от линейной модели, циклический подход предлагает итеративный цикл: «ресурс - продукт - вторичный ресурс - новый продукт». Ключевые принципы концепции включают проектирование с учетом последующей переработки, повторное использование компонентов, глубокую переработку отходов во вторичное сырье, востребованное в экономике, и компенсацию ущерба, нанесенного окружающей среде. [6]

В строительном секторе внедрение принципов кругового движения обусловлено специфическими особенностями отрасли: длительным сроком службы зданий (50-100 лет и более) позволяют заложить основу для потенциального повторного использования изделий при демонтаже конструкций, срок службы которых истек, уже на стадии проектирования; большинство используемых конструкционных материалов (бетон, строительная керамика, сталь, стекло, минеральные заполнители) инертны и пригодны для вторичной переработки без каких-либо ограничений. значительная потеря качества при сохранении свойств, применимых в производстве.

Иерархия циркулярных стратегий в строительстве должна выстраиваться по принципу приоритетности: предотвращение образования избыточных отходов → повторное использование отходов → переработка во вторичное сырьё → рекуперация затраченной энергии → захоронение на полигонах неприменимых остатков при исчерпании возможных способов и технологий их использования. [10]

В Российской Федерации переход к циркулярной модели в строительстве находится на начальном этапе. К числу сдерживающих факторов можно отнести несовершенство действующей нормативно-правовой базы, стимулирующей инициативу переработки отходов; отсутствие достаточного внимания к разработке технологических процессов переработки и использования вторничного сырья; отсутствие теоретического и, как следствие, практического обоснования экономического эффекта использования вторичного сырья при сохраняющейся дешевизне первичных природных ресурсов; отсутствие развитой сети предприятий по глубокой сортировке отходов и переработке строительного мусора. [8]

Вместе с тем, в рамках национального проекта «Экология» и Стратегии развития строительной отрасли до 2035 года предусмотрены меры по увеличению доли перерабатываемых отходов, что создаёт прецедентную основу для вовлечения техногенных продуктов в хозяйственный оборот страны.

Постановка задачи

Одним из приоритетных направлений в рамках циркулярной трансформации представляет концепция промышленного симбиоза, при которой отходы одного производства служат сырьевым ресурсом для другого. Классическими примерами реализации данного подхода служат использование золуноса тепловых электростанций в производстве цемента и металлургических шлаков в дорожном строительстве.

Объектом исследования является отработанный сульфокатионный катализатор марки КУ2-ФПП, который образуется на предприятиях нефтехимической, энергетической и водоочистной промышленности. В настоящее время этот материал классифицируется как крупномасштабные отходы III-IV классов опасности, которые необходимо утилизировать на дорогостоящих свалках. [1]

Однако с точки зрения экономики замкнутого цикла отходы можно рассматривать как потенциально ценный вторичный ресурс, пригодный для переработки в модифицирующую добавку для производства бетонных композитов. [4]

Целью исследования является обоснование технологической и экологической целесообразности использования отработанного катализатора КУ2-ФПП в строительном секторе. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать и оценить физико-химические параметры отработанного катализатора с целью определения его перспективности в роли модификатора бетонных смесей;

2. Выявить технологические ограничения, связанные с термической стабильностью, остаточной ионообменной способностью и содержанием загрязняющих компонентов;

3. Определить оптимальные направления предварительной подготовки отхода перед введением в бетонную смесь;

4. Оценить экологические и экономические эффекты от внедрения предлагаемого решения в сравнении с существующей практикой захоронения.

Методы исследования

Объектом исследования является отработанный на предприятии нефтехимического профиля катализатор КУ-2ФПП. Физико-химическая характеристика образцов выполнялась с применением комплекса стандартизованных методов: гранулометрического анализа, определения насыпной плотности, низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ), ИК-спектроскопии, термогравиметрии и атомно-абсорбционной спектрометрии. Остаточная ионообменная ёмкость определялась титриметрическим методом, адгезионные свойства поверхности оценивали по изменению краевого угла смачивания. Обработка экспериментальных данных проведена методами вариационной статистики при доверительной вероятности 95 %.

Обсуждение результатов

Физико-химическая характеристика объекта исследования. Отработанный катализатор КУ-2ФПП представляет собой сульфированный сополимер стирола с дивинилбензолом, имеющий пространственную сетчатую структуру. При долгой работе ионообменный катализатор теряет активность по трём основным причинам: поры забиваются коллоидными частицами, сульфогруппы окисляются, а сами гранулы истираются. [9] При этом полимерная матрица - сшитый дивинилбензолом полистирол - в целом сохраняется. Именно она и представляет интерес для стройки. Гранулы представляют собой в основном сферы диаметром от 0,5 до 2,5 мм. Есть примесь мелочи - Фракция меньше 0,5 мм, которая натирается при эксплуатации. Насыпная плотность отработки - 720-780 кг/м. Для сравнения: кварцевый песок - 1400-1600 кг/м, гранитный щебень - 1400-1700 кг/м. То есть катализатор примерно вдвое легче обычных заполнителей, и это позволяет снижать среднюю плотность бетона. [11]

Удельная поверхность по БЭТ - 42-58 м2/г. Пористость развитая, гранулы реакционноспособны. Полимерный каркас эластичен за счёт сшивки дивинилбензолом, и в бетоне он создаёт микрозоны пониженной жёсткости. Такие зоны рассеивают звук и механические колебания, поэтому добавка перспективна для акустических и вибродемпфирующих конструкций.

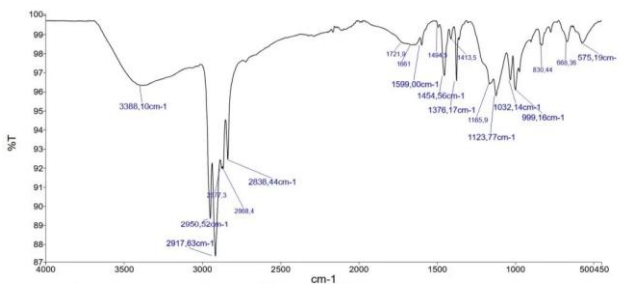


Рисунок 1 - Картина инфракрасного спектра

Картина инфракрасного спектра ясно свидетельствует, что на поверхности отработанного катализатора присутствуют загрязняющие вещества: альдегиды (пики в области 2917,63 см-1), алканы (2838,44 см-1, 2950,52 см-1 пики отвечают валентным колебаниям CH-связи) и алкены (1454,56 см-1, деформационные колебания CH3- и CH2-групп), сложные эфиры (пик в области 3388,1), 1599,00см$^{-1}$, 1494,5 см$^{-1}$: пики являются характерными для валентных колебаний C-C связей в ароматическом кольце (бензольном ядре), что является сильным доказательством наличия полистирольной основы катионита.

По термогравиметрии матрица КУ-2ФПП держит структуру до 120-150°С. Выше начинается разрушение сульфогрупп с выделением газов. При 250°С и выше гранулы плавятся и деполимеризуются с выделением летучих органических соединений. Отсюда жёсткие рамки: добавка годится для бетонов, твердеющих при 20 + 5 °С, и для конструкций, работающих при умеренных температурах. Она не подходит для огнезащитных покрытий, футеровок печей и всего, что рядом с интенсивным тепловым излучением. При оценке пожаростойкости таких конструкций нужно отдельно учитывать риск газовыделения. [13]

Состав загрязнителей зависит от того, где катализатор работал. Если это водоподготовка - накапливаются железо, марганец, кальций, магний. Если нефтехимия - остатки нефтепродуктов, ароматика, сернистые соединения. Промывка дистиллированной водой 60-90 минут снижает содержание водорастворимых примесей на 65-80 %. Сушка при 80-105 °С убирает влагу и лёгкие органические фракции. Измельчение до 0,1-0,5 мм улучшает равномерность распределения добавки в смеси и увеличивает площадь контакта с цементным камнем: по измерению краевого угла смачивания адгезия растёт в 1,3-1,5 раза. [2]

Главный вопрос, который пока не закрыт, - остаточная ионообменная ёмкость сульфогрупп (-OзH). В бетонной смеси они конкурируют за кальций, алюминий и железо из поровой жидкости. Это может тормозить гидратацию алита и белита, то есть увеличивать сроки схватывания и снижать раннюю прочность. Предварительная нейтрализация щелочью (например, NaOH 0,1-0,5 М) снижает ионообменную активность до приемлемого уровня. При дозировке 2-5 % от массы цемента и нейтрализации полимер начинает работать в плюс: смесь лучше удерживает воду, меньше водоотделение, удобоукладываемость выше. Кроме того, переходный слой между гранулами и цементным гелем получается плотнее, и это может компенсировать просадку ранней прочности за счёт упрочнения на поздних сроках. [6]

С точки зрения циркулярной экономики здесь всё складывается. Экологически - меньше загрязнения почв и грунтовых вод продуктами деструкции полимера и токсичными элементами, меньше захоронения отходов III-IV класса опасности, меньше нагрузки на полигоны.

Экономически - двойная выгода. Для предприятия, у которого образуется отход, снижаются затраты на утилизацию: захоронение стоит 3000-5000 руб./т, а подготовка к переработке — 800-1200 руб./т. Для производителя стройматериалов это дешевый модификатор вместо импортных полимерных добавок по 150-300 тыс. руб./т. При переработке 1000 т отработки интегральный эффект только за счёт логистики и полигона оценивается в 2,5-4,0 млн руб. [2]

Вывод

1. Отработанный сульфокатионитовый катализатор КУ-2ФПП обладает совокупностью физико-химических свойств, обуславливающих его перспективность в качестве легкого структурообразователя и модифицирующей добавки для бетонных композитов.

2. Технологическими ограничениями применения являются ограниченная термическая стабильность, что исключает использование добавки в высокотемпературных условиях и требует учёта поведения материала при пожаре, а также наличие остаточной ионообменной способности, способной замедлять гидратацию цемента.

3. Обязательным этапом подготовки катализатора к введению в бетонную смесь является промывка для удаления слабосвязанных загрязнителей, сушка, механическое измельчение до фракции 0,1-0,5 мм. Для снижения негативного влияния на кинетику твердения рекомендуется предварительная нейтрализация остаточных сульфогрупп слабым раствором щёлочи.

4. Вовлечение отработанного катализатора в строительный оборот полностью соответствует принципам циркулярной экономики промышленного симбиоза. Реализация предлагаемого решения обеспечивает экологический и экономический эффект, что подтверждает целесообразность дальнейших исследований в направлении оптимизации рецептур бетонных смесей с данным видом вторичного ресурса.

Перспективными направлениями последующих работ являются: установление точных зависимостей «дозировка добавки - кинетика твердения - конечные физико-механические характеристики бетона»; исследование долговременной стойкости и морозостойкости композитов с включением катализатора; разработка проекта технических условий на использование переработанного катализатора КУ-2ФПП в строительстве; формирование нормативно-методической базы для сертификации вторичных полимерных добавок в бетонах.

Литература

1. Арутюнов И. А. Переработка отработанного хромсодержащего катализатора // eLIBRARY.ru. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=42393401

2. Белых А. Л. Модели формирования промышленного симбиоза // Управление. 2023. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-formirovaniya-promyshlennogo-simbioza

3. Калашников В. И., Махамбетова К. Н., Мороз М. Н., Петухов А. В. Исследование влияния модифицированной полимерной добавки, модифицированной полиакриламидами, на водоудерживающую способность и прочность цементно-песчаных растворов // Современные научные исследования и инновации, 2015. URL: https://web.snauka.ru/issues/2015/04/52123

4. Козловская И. Ю. Свойства отработанного катализатора каталитического крекинга и возможности его применения для сорбционной очистки сточных вод // CyberLeninka. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-otrabotannogo-katalizatora-kataliticheskogo-krekinga-i-vozmozhnosti-ego-primeneniya-dlya-sorbtsionnoy-ochistki-stochnyh-vod

5. Колотыгин В.С. Исследование процессов работы и регенерации ионообменных катализаторов типа КУ-2ФПП // Электронные репозитории выпускных и научных работ. URL: https://elib.utmn.ru/jspui/bitstream/rutsu/5465/1/KolotyginVS_2020.pdf

6. Куркова А. С. Циркулярная экономика как катализатор развития рынка строительства в современном обществе // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. №12-2. URL:

https://cyberleninka.ru/article/n/tsirkulyarnaya-ekonomika-kak-katalizator-razvitiya-rynka-stroitelstva-v-sovremennom-obschestve
7. Модифицирование свойств гидротехнических бетонов с использованием полимерной добавки на основе поливинилпирролидона // Tsilicates.ru. URL: https://tsilicates.ru/ru/nauka/article/83768/view
8. Патент России RU 2163507 C2 «Способ получения термостойких сульфоионитных катализаторов» URL: https://patents.google.com/patent/RU2163507C2/ru
9. Полимерцементные легкие бетоны для ограждающих конструкций // disserCat. URL: https://www.dissercat.com/content/polimertsementnye-legkie-betony-dlya-ograzhdayushchikh-konstruktsii
10. Смолка А. В., Усаткина О. И. Строительный комплекс: циклические решения в сфере утилизации строительных отходов // ИВД. 2025. №11 (131). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/stroitelnyy-kompleks-tsiklicheskie-resheniya-v-sfere-utilizatsii-stroitelnyh-othodov
11. Угляница А. В. «Модификация цементных бетонов отработанным катализатором производства капролактама» // CyberLeninka. URL:https://cyberleninka.ru/article/n/modifikatsiya-tsementnyh-betonov-otrabotannym-katalizatorom-proizvodstva-kaprolaktama
12. Угляница А. В. «О возможности модификации цементных бетонов отработанным катализатором производства анилина» // CyberLeninka. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/o-vozmozhnosti-modifikatsii-tsementnyh-betonov-otrabotannym-katalizatorom-proizvodstva-anilina
13. Черкасова Т. Г. Рециклинг отработанных катализаторов для экологической защиты окружающей среды // CyberLeninka. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/retsikling-otrabotannyh-katalizatorov-dlya-ekologicheskoy-zaschity-okruzhayuschey-sred

Resource Potential of Technogenic Waste in the Context of Circular Transformation of the Construction Industry (A Case Study on the Utilization of Spent Catalyst KU-2FPP)

Kasperavichyus M.V., Miroshnichenko I.Yu.
Yaroslavl State Technical University, YarProekt LLC

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

The article examines conceptual approaches to integrating the principles of the circular economy in the production of construction materials. An analysis of the barriers and prospects for incorporating man-made waste into the production cycle has been carried out. The economic efficiency of reusing spent chemical catalysts as additives in composite concrete mixtures during their industrial production has been assessed. The possibility of using the spent sulfocation exchange catalyst KU-2FPP as a modifying additive for concrete composites has been substantiated. A detailed description of the physicochemical properties of spent KU-2FPP is presented. The technological and design limitations of its use in the production of composite concrete have been identified. The necessity and methods of preliminary treatment of the catalyst before introducing it into the mixture have been substantiated. An assessment analysis of the economic effect of abandoning the disposal of the catalyst, which is a hazardous industrial waste, has been carried out..

Keywords: circular economy, construction waste, secondary resources, spent catalyst KU-2FPP, concrete modification, sustainable development, industrial symbiosis.

References

1. Arutyunov I. A. Processing of Spent Chromium-Containing Catalysts // eLIBRARY.ru. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=42393401
2. Belykh A. L. Models for the Formation of Industrial Symbiosis // Management (Upravlenie). 2023. No. 1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-formirovaniya-promyshlennogo-simbioza
3. Kalashnikov V. I., Makhambetova K. N., Moroz M. N., Petukhov A. V. Investigation of the Influence of a Polymeric Additive, Modified with Polyacrylamides, on the Water-Retention Capacity and Strength of Cement-Sand Mortars // Modern Scientific Research and Innovations (Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii), 2015. URL: https://web.snauka.ru/issues/2015/04/52123
4. Kozlovskaya I. Yu. Properties of Spent Catalytic Cracking Catalysts and Their Potential Application for the Sorption-Based Purification of Wastewater // CyberLeninka. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-otrabotannogo-katalizatora-kataliticheskogo-krekinga-i-vozmozhnosti-ego-primeneniya-dlya-sorbtsionnoy-ochistki-stochnyh-vod
5. Kolotygin V. S. Investigation of the Operation and Regeneration Processes of KU-2FPP-Type Ion-Exchange Catalysts // Electronic Repositories of Theses and Scientific Works. URL: https://elib.utmn.ru/jspui/bitstream/ru-tsu/5465/1/KolotyginVS_2020.pdf
6. Kurkova A. S. The Circular Economy as a Catalyst for the Development of the Construction Market in Modern Society // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2018. No. 12-2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsirkulyarnaya-ekonomika-kak-katalizator-razvitiya-rynka-stroitelstva-v-sovremennom-obschestve
7. Modifying the Properties of Hydraulic Concretes Using a Polyvinylpyrrolidone-Based Polymer Additive // Tsilicates.ru. URL: https://tsilicates.ru/ru/nauka/article/83768/view
8. Russian Patent RU 2163507 C2 "Method for Producing Heat-Resistant Sulfo-Ion-Exchange Catalysts" // URL: https://patents.google.com/patent/RU2163507C2/ru
9. Polymer-Cement Lightweight Concretes for Building Envelope Structures // disserCat. URL: https://www.dissercat.com/content/polimertsementnye-legkie-betony-dlya-ograzhdayushchikh-konstruktsii
10. Smolka A. V., Usatkina O. I. The Construction Complex: Circular Solutions for Construction Waste Management // IVD. 2025. No. 11 (131). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/stroitelnyy-kompleks-tsiklicheskie-resheniya-v-sfere-utilizatsii-stroitelnyh-othodov
11. Uglyanitsa A. V. "Modification of Cement Concretes Using Spent Catalysts from Caprolactam Production" // CyberLeninka. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modifikatsiya-tsementnyh-betonov-otrabotannym-katalizatorom-proizvodstva-kaprolaktama
12. Uglyanitsa A. V. "On the Possibility of Modifying Cement Concretes Using Spent Catalysts from Aniline Production" // CyberLeninka. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/o-vozmozhnosti-modifikatsii-tsementnyh-betonov-otrabotannym-katalizatorom-proizvodstva-anilina
13. Cherkasova T. G. "Recycling of Spent Catalysts for Environmental Protection" // CyberLeninka. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/retsikling-otrabotannyh-katalizatorov-dlya-ekologicheskoy-zaschity-okruzhayuschey-sred

y