

VI. ЭКОНОМИКА И ЭКОЛОГИЯ: ПРОБЛЕМЫ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ И ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА. ЭКОНОМИКА АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

УДК 334.02

A.A. Artemiev, S.K. Ghosh

А.А. Артемьев¹, С.К. Гош²

THE ROLE OF GREEN ENERGY IN THE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL PROCESSING OF SECONDARY MATERIALS

This article examines the synergistic effect of integrating green energy sources (GES) into the waste processing (recycling) industry. It argues that the high energy intensity of crushing, smelting, chemical regeneration, and sorting processes renders the economics of secondary materials vulnerable to fluctuations in fossil fuel prices. Renewable energy emerges not merely as a means of reducing the carbon footprint, but as a catalyst for technological modernization, enabling the creation of decentralized, autonomous clusters characterized by zero marginal energy costs. Through an analysis of various processing technologies, it is demonstrated that the transition to green energy boosts the profitability of recycling secondary raw materials by 30–40%. The study concludes that a new paradigm of the circular economy is taking shape—one grounded in hybrid energy-material systems.

Keywords: secondary material resources, green energy industry, renewable energy sources, recycling, circular economy, energy intensity.

РОЛЬ "ЗЕЛЁНОЙ" ЭНЕРГЕТИКИ В РАЗВИТИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье рассматривается синергетический эффект от интеграции "зелёной" энергетики в индустрию переработки отходов (рециклинга). Обосновывается, что высокая энергоёмкость процессов дробления, плавки, химической регенерации и сортировки делает экономику вторичных материалов уязвимой перед колебаниями цен на ископаемое топливо. Альтернативная энергетика выступает не просто как способ снижения углеродного следа, а как катализатор технологической модернизации, позволяющий создавать децентрализованные автономные кластеры с низкой маржинальной стоимостью энергии. На примере анализа ряда технологий переработки показано, что переход на "зелёную" энергию повышает рентабельность переработки вторичного сырья на 30-40%. Сделан вывод о формировании новой парадигмы циклической экономики, базирующейся на энерго-материальных гибридных системах.

Ключевые слова: вторичные материальные ресурсы, "зелёная" энергетика, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), рециклинг, циклическая экономика, энергоёмкость.

DOI: 10.36807/2411-7269-2026-2-45-123-127

Согласно парадигме циклической экономики, использование вторичных материалов и внедрение возобновляемых источников энергии выступают двумя основополагающими столпами современной экономики, призванными обеспечить охрану окружающей среды и повышение уровня жизни [1], [2]. Таким образом, взаимосвязь, объединяющая переработку отходов, внедрение "зелёной" энергетики и устойчивое развитие, приобретает критическое значение для обеспечения долгосрочного экологического благополучия и экономической устойчивости, тем самым способствуя достижению более широких целей в рамках Целей в области устойчивого развития Организации Объединённых Наций (ЦУР ООН) – в частности, ЦУР 12, ориентированной на обеспечение ответственного потребления и производства [3].

Современная индустрия вторичных материалов исторически развивалась в парадигме дешёвого ископаемого топлива. Угольный кокс для переплавки металлолома, природный газ

¹ Артемьев А.А., временно исполняющий обязанности ректора, доктор экономических наук, профессор; Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования "Тверской государственный технический университет", г. Тверь

Artemiev A.A., Acting Rector, Doctor of Economics, Professor; Federal State Budgetary Institution of High Education "Tver State Technical University", Tver
E-mail: aaartemiev@rambler.ru

² Гош С.К., Генеральный директор Центра исследований устойчивого развития и циркулярной экономики, Международное общество по управлению отходами, воздухом и водой, доктор экономических наук, профессор; Калькутта, Индия

Ghosh S.K., Director General, Sustainable Development and Circular Economy Research Centre, International Society of Waste Management, Air and Water, Doctor of Economics, Professor; Kolkata, India
E-mail: sadhankghosh9@gmail.com

для сушки целлюлозы, нефтепродукты для экструзии пластика представляли собой типичный набор источников энергии для переработки вторичных материальных ресурсов в XX веке. Однако в третьем десятилетии XXI века эта модель сталкивается с рядом фундаментальных вызовов.

Первым из таких вызовов является волатильность цен на углеводороды, которая делает бизнес-планирование промышленной переработки вторичных материалов рискованным. В качестве второго вызова выступают экологические регуляторы, которые оказывают финансовое давление на предприятия, допускающие высокие выбросы углекислого газа, и делают использование энергии из угля и газа в различных отраслях промышленности всё менее привлекательной. Следующим фундаментальным вызовом, о котором стоит сказать отдельно, является рост энергоёмкости индустрии рециклинга по мере исчерпания легкодоступных фракций отходов (например, переход от переплавки чистого лома к переработке многокомпонентных электронных плат).

Понятие "зелёной" энергетики включает возобновляемые источники энергии (ВИЭ), к которым относят солнечную, ветровую, геотермальную, гидро- и биоэнергетику [4]. Эти виды энергии долгое время рассматривались лишь в контексте уменьшения выбросов углекислого газа от самого процесса переработки вторичных ресурсов. Однако результаты современных исследований, проведённых учёными за последние десять лет [5], [6], позволили собрать эмпирические данные, которые показывают более глубокую роль, при которой возобновляемые источники энергии становятся структурным элементом технологической платформы переработки отходов.

Цель данной статьи состоит в анализе роли "зелёной" энергетики не только в процессе замещения ископаемого топлива в балансе предприятий по переработке вторичных ресурсов, но и в процессе качественной перестройки их логистических систем, технологических процессов и номенклатуры извлекаемых материалов.

В соответствии с целью, в ходе исследования авторами были поставлены и решены следующие задачи:

- провести анализ энергоёмкости типовых процессов переработки вторичных материалов (изношенных шин, металлического лома);
- выявить точки сопряжения технологий "зелёной" энергетики и вторичной переработки, дающие синергетический эффект;
- оценить эффекты от замещения ископаемого топлива на возобновляемые источники в технологических процессах переработки вторичных материалов.

Исследование основано на систематическом обзоре современных научных публикаций по вторичной переработке различных материалов, обобщении собранной информации и систематизации данных. С точки зрения теории циклической экономики, интеграция "зелёной" энергетики переводит рециклинг из линейной цепочки "отходы – энергозатраты – продукт" в квази-автономную систему, где отходы становятся одновременно и сырьём, и (через сжигание или биогаз) частичным источником энергии [7]. Однако в данной статье авторы сфокусировали своё внимание не на утилизации отходов как топлива, а на возможностях интеграции других видов "зелёной" энергии в промышленную переработку вторичных материалов.

Энергия является важным элементом формирования и развития процессов рециркуляции ресурсов. Она напрямую влияет на их экологическую, экономическую и социальную эффективность. В отличие от добычи первичного сырья (руда, нефть, лес), где энергия составляет 5-15% себестоимости, во вторичной переработке доля энергозатрат достигает 40-60% [8]. Это обусловлено необходимостью:

- разрушения композитных связей (например, в изношенных автомобильных шинах);
- очистки от загрязнений (мойка, сушка, экстракция);
- термической деструкции или плавления при температурах, превышающих 1000°C;
- тонкого магнитного и оптического разделения.

Например, для производства 1 т вторичного алюминия из лома требуется около 700 кВт·ч электроэнергии (против 14000 кВт·ч для первичного алюминия из бокситов), но в абсолютном выражении для завода мощностью 100 тыс. т в год это 70 млн кВт·ч – потребление малого города [9].

Резиновая крошка – один из множества продуктов, получаемых в процессе материальной утилизации изношенных шин. Как правило, изношенные шины подвергаются измельчению и переработке в различных установках, таких как грануляторы, вальцовые дробилки (крэкеры), микромельницы. В зависимости от типа используемого оборудования резиновая крошка может иметь различные размеры частиц, текстуру и гранулометрический состав. При измельчении при комнатной температуре получают крошку, характеризующуюся, по сравнению с продуктом криогенного измельчения, меньшей плотностью, большей удельной поверхностью, шероховатой

текстурой и неправильной формой частиц. Тем не менее, в ряде исследований также уделено внимание применению новых технологий утилизации, включая гидроабразивное измельчение и озоновое крекирование; однако эти методы требуют значительных энергозатрат и сопряжены с практическими трудностями контроля параметров производства [10].

Следует рассматривать утилизацию изношенных шин как часть этапа получения сырья в различных процессах промышленной переработки, результатом которой становится создание таких продуктов, как асфальто-резиновые вяжущие для дорожного строительства, искусственные травяные покрытия, наполнители для бетона, дорожные ограждения и восстановленные шины [11]. Примечательно, что воздействие на окружающую среду на протяжении жизненного цикла производства резиновой крошки в качестве сырья для асфальто-резинового вяжущего, согласно имеющимся данным, составляет 100-500 кг углеродного эквивалента на метрическую тонну выбросов [11].

Восстановленная резина – это ещё один продукт, который может быть получен из изношенных шин путём регенерации резины с использованием физических или химических методов. В процессе регенерации трёхмерные поперечные связи резины разрушаются под воздействием внешних факторов, таких как тепло, механическая или микроволновая энергия, а также химические реагенты; это приводит к снижению молекулярной массы резиновых цепей. В ряде исследований [7], [10] отмечается потенциал использования композитов с добавлением регенерированной резины, а также возможности производства из них конвейерных лент, автомобильных шин и камер.

Аналогичным образом, микронизированная резиновая крошка, получаемая путём измельчения изношенных шин до частиц размером в десятки микрон, вводится в состав различных новых резиновых смесей для автомобильных шин, композитных древесно-стружечных плит и эпоксидных покрытий с целью улучшения их эксплуатационных свойств [10].

Несмотря на потенциальную возможность использования продуктов переработки изношенных автомобильных шин в качестве заменителей первичного сырья, следует отметить, что сбор, транспортировка и переработка отработанных шин требуют значительных затрат электроэнергии и топлива [10].

Замена углеводородного топлива на "зелёную" энергию в процессах вторичной переработки изношенных шин и металлического лома, как показывают опубликованные исследования, позволяет снизить как себестоимость получаемого вторичного сырья, так и углеродный след производства.

Основные характеристики возобновляемых источников энергии (ВИЭ), которые важно учитывать при включении их в технологические процессы переработки вторичных ресурсов, представлены на Рис. 1.

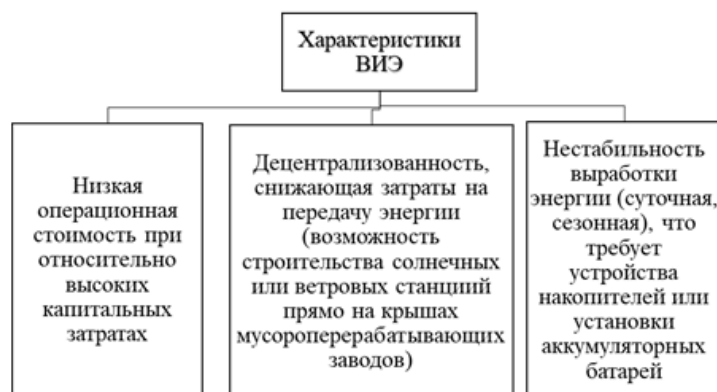


Рисунок 1 – Характеристики ВИЭ, влияющие на процессы переработки вторичных ресурсов

Одним из энергозатратных элементов технологической цепочки предприятий по переработке отходов являются системы оптической сортировки, конвейеры и шредеры. Их пиковая мощность обычно 200-500 кВт. В некоторых регионах мира практикуется покрытие крыш складов и сортировочных линий монокристаллическими солнечными панелями. В часы максимальной инсоляции (12:00-15:00) сортировочная линия получает до 80% энергии от солнца, а остальное – от сети или аккумуляторов [11].

Традиционно пиролиз шин, пластика, RDF-топлива использует факельный нагрев от сжигания части самого продукта, что снижает выход жидкой и газовой фазы. Альтернативным вариантом в данном случае является электрический пиролиз с нагревом от ВИЭ. Электрические реакторы позволяют точно выдерживать температурный режим (450-750°C), получая больше мономеров [12].

Переработка литий-ионных аккумуляторов (Li, Co, Ni) включает стадию кислотного выщелачивания с последующим электроосаждением. Этот процесс требует стабильного постоянного тока низкого напряжения (3-5 В), но сотни ампер. Синхронизация с ВИЭ является проблематичной из-за пульсаций, но применение конденсаторных накопителей и систем MPPT (Maximum Power Point Tracking) позволяет сгладить график [13].

Кроме того, построенная учёными модель показывает снижение углеродного следа переработанной продукции на 78% (с 520 до 115 кг CO₂/т), что открывает доступ к премиальным рынкам "зелёных материалов" (например, в производстве электромобилей Tesla, BMW, которые требуют сертификацию вторичных компонентов) [13].

Несмотря на очевидные преимущества, массовое внедрение "зелёной" энергетики в промышленную переработку вторичных материалов сдерживается несколькими причинами.

Одной из основных причин является высокая капиталоемкость. Не все предприятия по переработке вторичных материалов имеют доступ к долгосрочному, относительно дешёвому финансированию. Особенно проблематично это для малых сортировочных станций в странах с высокими кредитными ставками (>12%).

Для некоторых стран в качестве барьера выступает значительная потребность в площадях. В плотно застроенной Европе сложно найти место рядом с городскими свалками или центрами сбора отходов [14].

На определённой стадии реализации проектов внедрения ВИЭ в системы переработки вторичных ресурсов, возникают проблемы утилизации самих ВИЭ-установок: Например, фотоэлектрические панели содержат кадмий, свинец; лопасти ветряков из композитов не перерабатываются дешёво. Создаётся потенциально новый вид отходов.

Существуют нормативно-правовые ограничения. Во многих странах запрещена обратная продажа избыточной энергии ВИЭ в сеть по "зелёному" тарифу для промышленных объектов. Это снижает экономическую привлекательность.

В некоторых странах появляются специализированные энергосервисные компании (ESCO), действующие в сфере переработки вторичных ресурсов. В рамках контрактов, заключаемых с перерабатывающими предприятиями, эти компании за свой счёт ставят на предприятиях системы по производству энергии из возобновляемых источников (солнечной, ветровой) и получают оплату из экономии на энергии. Это снижает порог входа участников на рынок возобновляемых ресурсов.

По результатам исследования целесообразно сформулировать следующие рекомендации:

- включать показатель "доля ВИЭ в переработке" в экологические рейтинги отрасли переработки вторичных ресурсов;
- создавать энергетические кооперативы из нескольких предприятий вторичной переработки, совместно владеющих, например, ветропарком;
- субсидировать не просто "зелёную" энергетику, а именно интеграцию ВИЭ с системами накопления для непрерывных процессов.

Роль "зелёной" энергии в развитии промышленности вторичных материалов переходит от факультативной (PR и снижение углеродного следа) к системообразующей. Наличие дешёвого, климатически-нейтрального электричества напрямую расширяет экономически доступную номенклатуру отходов: становится выгодно перерабатывать сложные композиты, электронику с низким содержанием ценных металлов, загрязнённые полимеры.

Кроме того, ВИЭ решают проблему "вторичного сырья как более дорогой альтернативы". При более дешёвой энергетической составляющей в переработке себестоимость вторичного алюминия и меди становится на 30-40% ниже первичной даже без учёта экологических штрафов. Таким образом, "зелёная" энергия выступает не только этическим, но и экономическим двигателем циклической экономики.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание математических моделей энергосетей с высокой долей ВИЭ именно для прерывистых процессов рециклинга, а также на разработку дешёвых твердотельных накопителей, способных перекрывать недельные периоды штиля и низкой облачности.

Список использованных источников

1. Любарская М.А. Теоретические и практические аспекты низкоуглеродного развития экономики // Экономический вектор. – 2021. – № 2(25). – С. 100-104.
2. Sudan N., Singh A., Bhat C.G., Biligiri K.P. Lifecycle assessment of end-of-life tire recycling through pathways of transitioning the recycling industry to renewable energy sources// Resources, Conservation and Recycling. – 2025. – № 216. – С. 108-116.

3. Афоничкина Е.А. Системность в достижении целей устойчивого развития // Системный анализ в проектировании и управлении. – 2021. – № 2. – С. 483-487.
4. Любарская М.А., Меркушева В.С., Зиновьева О.С. Участие России в международном сотрудничестве в сфере сокращения выбросов парниковых газов энергетическими компаниями // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия "Международные отношения". – 2019. – Т. 19. – № 3. – С. 377-391.
5. Кузнецова С.Н., Назарова А.Н., Некрасов Н.М., Мольков Е.Н. Зелёная экономика и устойчивое развитие промышленных парков // Московский экономический журнал. – 2023. – № 2. – С. 371-378.
6. Powell J.T., Chertow M.R., Esty D.C. Where is global waste management heading? An analysis of solid waste sector commitments from nationally-determined contributions // Waste Management. – 2018. – № 80. – С. 137-143.
7. Чекалин В.С., Любарская М.А., Дегтярева В.А. Потенциал участия энергетических компаний в повышении экологической безопасности российских регионов // Вестник Тверского государственного университета. Серия Экономика и управление. – 2021. – № 4(56). – С. 82-90.
8. Gaidhane J., Ullah I., Khalatkar A. Tire remanufacturing: A brief review// Materials Today: Proceedings. – 2023. – № 60(3). – С. 2257-2261.
9. Будон С.В., Ибрагимов А.Т., Михайлова О.И., Медведев В.В. Гидрохимическая переработка красных шламов АО "Алюминий Казахстана" // Записки Горного института. – 2013. – Т. 202. – С. 44-47.
10. Bowles A.J., Fowler G.D., O'Sullivan C., Parker K. Sustainable rubber recycling from waste tires by waterjet: A novel mechanistic and practical analysis // Sustainable Material and Technologies. – 2020. – № 25. – С. 173-186.
11. Formela K. Sustainable development of waste tires recycling technologies – recent advances, challenges and future trends// Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. – 2023. – № 60. – Т. 3. – С. 2257-2261.
12. Das A., Saini V., Parikh K., Parikh J., Ghosh P., Tot M. Pathways to net zero emissions for the Indian power sector // Energy Strategy Reviews. – 2023. – № 45. – С. 101-114.
13. Manzano-Agugliaro F., Alcayde A., Montoya F.G., Zapata-Sierra A., Gil C. Scientific production of renewable energies worldwide: An overview // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – № 18. – С. 134-143.
14. Sienkiewicz M., Kucinska-Lipka J., Janik H., Balas A. Progress in used tires management in the European Union: A review // Waste Management. – 2012. – № 32(10). – С. 1742-1751.