

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ФИНАНСЫ В УСЛОВИЯХ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ

УДК 338.22.021.4

Велигура А.В., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОЦИО- ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГИОНА В КОНТЕКСТЕ ЭКОНОМИКИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА

Аннотация: В статье разработана математическая модель функционирования социо-эколого-экономической системы региона в контексте экономики замкнутого цикла. Модель учитывает взаимодействие семи ключевых отраслей экономики Луганской Народной Республики — угольной, металлургической, машиностроительной, химической, сельского хозяйства, переработки отходов и энергетики — и их влияние на социальные и экологические параметры. Основу модели составляют системы уравнений, описывающих потоки ресурсов и отходов, экологические воздействия и социальный вклад отраслей. Представлены параметры отраслей и предложен интегральный показатель эффективности функционирования региона. Работа закладывает основу для компьютерной реализации модели и проведения сценарного анализа устойчивого развития региона на принципах экономики замкнутого цикла.

Ключевые слова: экономика замкнутого цикла; социо-эколого-экономическая система; цифровизация; математическое моделирование; устойчивое развитие; регион.

В условиях стремительного развития цифровых технологий и возрастания вызовов устойчивого развития все большую актуальность приобретает переход к экономике замкнутого цикла. Традиционные модели экономического роста, основанные на чрезмерном использовании природных ресурсов, оказываются несостоятельными в современных реалиях, что требует переосмысления принципов функционирования региональных социо-эколого-экономических систем (СЭЭС). Важность внедрения принципов экономики замкнутого цикла (ЭЗЦ) на региональном уровне подчеркивается в работах российских исследователей, акцентирующих внимание на необходимости цифровизации процессов ресурсосбережения и переработки отходов [3, с.394].

Реализация концепции ЭЗЦ требует разработки комплексных моделей, способных учитывать социальные, экологические и экономические аспекты развития территорий. Исследования в этой области подтверждают важность построения системных информационных моделей регионов для обеспечения эффективного управления ресурсными потоками и прогнозирования сценариев развития [5, с.147]. Одним из направлений научного поиска является разработка методов оценки и прогнозирования уровня социально-экономического развития, с учетом динамики циркулярных процессов и устойчивости территориальных систем [4, с.50].

Особое значение в современных условиях приобретает моделирование сложных социально-экономических систем с использованием методов математического анализа и компьютерного моделирования. Работы отечественных ученых подчеркивают важность создания моделей, способных оценивать устойчивость и адаптивность регионов к изменениям внешней среды [6, с.428]. Кроме того, возникает необходимость интеграции методов оценки социально-экономических рисков в моделях функционирования территориальных систем [7, с.151], что особенно актуально в условиях нестабильности и неопределенности.

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена потребностью в создании математической модели функционирования СЭЭС региона, реализующей принципы ЭЗЦ и учитывающей современные вызовы цифровизации.

Цель исследования заключается в разработке математической модели функционирования региона в условиях ЭЗЦ, с последующей возможностью её компьютерной реализации.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи: провести анализ существующих подходов к моделированию СЭЭС; определить структуру модели и описать основные взаимосвязи между ее элементами; разработать математический аппарат, описывающий динамику ресурсов в условиях ЭЗЦ.

Переход к ЭЗЦ становится не просто одним из трендов устойчивого развития, а объективной необходимостью для решения комплекса социально-эколого-

экономических проблем на региональном уровне. Усиление антропогенной нагрузки на природную среду, снижение доступности невозобновляемых ресурсов, рост объемов отходов, социальная нестабильность и экономические вызовы требуют переосмысления существующих моделей функционирования территориальных систем.

На фоне глобальных процессов цифровизации возникает возможность создания интеллектуальных систем управления ресурсными потоками, что позволяет оптимизировать процессы производства, потребления и утилизации, снижать нагрузку на окружающую среду и одновременно повышать качество жизни населения. Как отмечено в современных исследованиях, цифровые технологии являются неотъемлемым инструментом реализации принципов ЭЗЦ на региональном уровне [3, с.394], [5, с.146].

Актуальность разработки математических моделей функционирования регионов, реализующих принципы замкнутого цикла, также обусловлена необходимостью комплексного учета взаимодействия социальных, экономических и экологических факторов развития [4, с.48], [6, с.427]. Кроме того, современные модели должны учитывать социально-экономические риски [7, с.151] и быть адаптивными к быстро меняющимся условиям внешней среды. Отсутствие таких моделей ограничивает возможности эффективного планирования и прогнозирования устойчивого развития территорий.

В этой связи формирование нового подхода к математическому и компьютерному моделированию СЭЭС региона приобретает особую значимость, обеспечивая основу для научно обоснованного управления в условиях цифровизации и экологических вызовов.

В последние годы вопросы моделирования СЭЭС регионов, особенно в контексте реализации принципов ЭЗЦ, приобрели особую актуальность. Одним из первых международных исследований в этой области стал доклад Фонда Эллен МакАртур [1, с.16], в котором изложены основы перехода к ЭЗЦ и возможности масштабирования соответствующих решений в глобальных цепочках поставок. Существенное развитие концепция получила в научной работе Geissdoerfer и

соавторов [2, с.760], где ЭЗЦ рассматривается как новая парадигма устойчивого развития.

В российской научной литературе в работе [3, с.394] автор предложил цифровые решения для поддержки ЭЗЦ на региональном уровне, акцентируя внимание на необходимости интеграции информационных технологий в управление природопользованием и экономикой. В исследовании [4, с.48] предлагается комплекс моделей для оценки и прогнозирования социально-экономического развития субъектов на уровне региона, что является важной предпосылкой для построения целостной модели устойчивого развития. В работе [5, с.146] была предложена информационная модель региона, учитывающая взаимодействие социальных, экономических и экологических подсистем, что соответствует современным требованиям к интеграции данных и системному анализу.

Особую роль в обосновании методов анализа сложных социально-экономических систем сыграли исследования Рамазанова С.К., Истомина Л.Ф. и Чмелева В.В. [6, с.427]. Авторы предложили оригинальные модели оценки устойчивости и рисков, которые могут быть адаптированы для целей ЭЗЦ. В свою очередь, Резник А.А. и Рязанцева Н.А. [7, с.151] разработали методику оценки социально-экономических рисков в регионах с применением математико-статистических методов, что также актуально для задач прогнозирования развития территорий в рамках устойчивой экономики.

Таким образом, анализ существующих публикаций показывает, что в настоящее время имеются как теоретические разработки, так и практические методики построения моделей функционирования регионов в условиях цифровизации и перехода к ЭЗЦ. Это определяет высокую актуальность разработки комплексной математической модели, учитывающей социальные, экономические и экологические аспекты в единой системе.

Для проведения комплексного анализа Луганской Народной Республики (ЛНР) как СЭЭС в контексте концепции ЭЗЦ, важно рассмотреть не только структуру самой экономики, но и взаимосвязи между ключевыми отраслями, а также их взаимодействие с социальными и экологическими блоками.

Экономика ЛНР формируется за счёт устойчивого функционирования ключевых отраслей, взаимосвязанных через потоки ресурсов, энергии, продукции и отходов. В условиях перехода к ЭЗЦ особую роль играют отрасли, способные обеспечить ресурсосбережение, переработку и минимизацию воздействия на окружающую среду. В рамках предлагаемой модели в качестве основных отраслей экономики региона выделяются:

Угольная промышленность – базовая для региона, обеспечивает топливно-энергетическую независимость и служит основой для энергетики и металлургии.

Металлургия – трансформирует минеральные ресурсы в металлы, используется в машиностроении и строительстве.

Машиностроение – производит оборудование для энергетики, сельского хозяйства и переработки отходов.

Химическая промышленность – производит удобрения, полимеры и реагенты, поддерживает агросектор и переработку.

Сельское хозяйство – обеспечивает продовольственную безопасность, поставяет биомассу и отходы на переработку.

Переработка отходов — важный элемент цикла замкнутого потребления, формирует вторичные ресурсы для других отраслей.

Энергетика – преобразует ископаемые и альтернативные источники энергии в электро- и теплоэнергию для остальных отраслей и населения.

Каждая отрасль связана как с другими секторами экономики, так и с социальной и экологической подсистемами. Взаимодействие происходит через потребление рабочей силы, энергии, сырья, а также через воздействие на экологические параметры – выбросы, отходы и потребление ресурсов.

Взаимосвязи между отраслевыми блоками региона, а также их связь с социальным и экологическим блоками, играют ключевую роль в реализации принципов экономики замкнутого цикла. Например, энергия, вырабатываемая в энергетическом секторе, поддерживает работу всех других отраслей, включая производство в обрабатывающей промышленности и

сельском хозяйстве. В свою очередь, отходы этих отраслей могут быть переработаны в качестве ресурсов для других производств. Так, отходы сельского хозяйства, такие как органические отходы, могут быть использованы в энергетике для производства биогаза.

Кроме того, важно отметить, что каждая из отраслей оказывает влияние на социальный блок, предоставляя рабочие места, обеспечивая население товарами и услугами, а также влияя на качество жизни населения. Например, развитие строительного сектора влияет на жилищные условия, а энергетическая отрасль обеспечивает стабильное энергоснабжение.

Каждая отрасль имеет определённые входы (ресурсы) и выходы (продукция или отходы). В рамках ЭЗЦ важно минимизировать количество отходов и обеспечивать их переработку. В таблице 1 представлены ключевые входы и выходы для каждой отрасли экономики Луганской Народной Республики.

Таблица 1 - Взаимосвязи для подсистем экономики замкнутого цикла

Отрасль	Отходы/Выходы	Используется как сырьё в
Угольная	Зола, CO ₂ , шлак	Энергетика (топливо), Переработка
Металлургия	Шлак, металл. отходы	Машиностроение, Переработка
Машиностроение	Металлолом, пром. вода	Переработка
Химическая	Побочные реагенты, CO ₂	С/х (удобрения), Энергетика
Сельское хозяйство	Биомасса, пищевые отходы	Энергетика, Химическая
Переработка	Вторичное сырьё	Все отрасли (замкнутый поток)
Энергетика	Тепло, выбросы	Все отрасли (электроэнергия)

В данной работе предлагается системно-динамическая модель, описывающая функционирование ЛНР как СЭЭС в рамках ЭЗЦ. Модель

охватывает ключевые отрасли экономики, перечисленные выше. Все отрасли взаимодействуют друг с другом через потоки ресурсов и отходов, а также влияют на социальные и экологические параметры региона.

Модель включает следующие переменные:

P_i – объём выпуска продукции в отрасли i ;

F_{ij} – поток сырья/отходов от отрасли i к j ;

R_i – потребление внешнего (неперерабатываемого) ресурса отраслью i ;

W_i – объём отходов, производимых отраслью i ;

E_i – уровень экологического загрязнения от i ;

S_i – социальный вклад отрасли i ;

ρ – коэффициент переработки;

$F(t)$ – целевая функция – интегральный показатель эффективности региона.

Базовые уравнения модели:

Угольная промышленность:

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = f_1(R_1) - F_{12} - F_{17} - W_1 \quad (1)$$

где F_{12} – поток ресурсов между угольной отраслью и металлургией (уголь),

F_{17} – поток ресурсов между угольной отраслью и энергетикой.

Металлургия:

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = f_2(F_{12} + R_2 + \rho W_6) - F_{23} - W_2 \quad (2)$$

где R_2 – объём внешних руд, W_6 – металл. отходы из переработки.

Машиностроение:

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = f_3(F_{23} + R_3 + \rho W_6) - W_3 \quad (3)$$

Входом является металл от металлургической отрасли, переработанные детали.

Химическая промышленность:

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = f_4(R_4 + \rho W_5 + W_1) - F_{45} - W_4 \quad (4)$$

Сельское хозяйство:

$$\frac{dP_5(t)}{dt} = f_5(R_5 + F_{45} + \rho W_6) - W_5 \quad (5)$$

Переработка отходов:

$$\frac{dP_6(t)}{dt} = f_6\left(\sum_i W_i\right) - \sum_i \rho W_i \quad (6)$$

Энергетика:

$$\frac{dP_7(t)}{dt} = f_7(F_{17} + W_1 + W_5 + \rho W_6) - W_7 \quad (7)$$

Каждая отрасль дополнительно влияет на экологическую и социальную подсистемы:

Экологическая подсистема:

$$\frac{dE(t)}{dt} = \sum_{i=1}^7 W_i - \gamma P_6 \quad (8)$$

где β_i – коэффициент загрязнения соответствующей отрасли, γ – эффективность очистки переработкой.

Социальные показатели:

$$\frac{dS(t)}{dt} = \sum_{i=1}^7 \delta_i P_i - \theta E \quad (9)$$

где δ_i – вклад отрасли в занятость/благосостояние, θ – урон от экологического загрязнения.

В модели определен показатель $F(t)$, отражающий совокупную эффективность функционирования региона:

$$F(t) = \sum_{i=1}^7 P_i(t) + S(t) - 2E(t) \quad (10)$$

Этот интегральный индикатор сбалансировано учитывает экономическое развитие (через выпуск продукции), социальное развитие

(уровень жизни и занятость), экологические потери (с удвоенным штрафным весом).

На основании статистических данных была проведена параметризация модели (таблица 2).

Таблица 2 - Параметризация отраслей экономики региона

Отрасль	Ресурсопотребление	Уровень отходов	Эко- коэф (β)	Соц. вклад (δ)
Угольная	высокое (уголь, вода)	высокий	0.30	0.50
Металлургия	высокое (уголь, руда)	высокий	0.25	0.40
Машиностроение	среднее (металлы, энергия)	средний	0.20	0.35
Химическая	высокое (сырье, газ)	средний	0.15	0.30
Сельское хоз-во	среднее (вода, удобрения)	средний	0.10	0.25
Переработка	низкое (отходы)	низкий	0.05	0.20
Энергетика	высокое (уголь, биомасса)	средний	0.12	0.40

В результате проведённого исследования была разработана концептуальная и математическая модель региона как СЭЭС, реализующей принципы ЭЗЦ. Модель учитывает семь ведущих отраслей экономики ЛНР – угольную, металлургическую, машиностроительную, химическую, сельское хозяйство, переработку отходов и энергетику, – а также их взаимосвязи с социальной и экологической подсистемами. Каждая отрасль была описана с использованием системы дифференциальных уравнений, учитывающих

потребление и передачу ресурсов, образование и переработку отходов, а также воздействие на экологическое состояние и социальную сферу региона.

Модель обеспечивает основу для анализа устойчивости и сбалансированности регионального развития с точки зрения ЭЗЦ. Она позволяет оценить влияние межотраслевых связей на динамику производственных и экологических параметров, а также на социальные показатели. Однако в рамках данного этапа работы была выполнена только формализация модели на концептуальном уровне и математическое описание ключевых взаимосвязей.

В перспективе планируется реализация модели на языке Python с целью проведения численных экспериментов, сценарного анализа и оценки эффективности предлагаемых управленческих решений. Это позволит глубже проанализировать потенциальные пути перехода региона к экономике замкнутого цикла и выявить стратегически важные точки воздействия на систему для достижения устойчивого развития.

Список использованных источников

1. Ellen MacArthur Foundation. Towards the Circular Economy: Accelerating the scale-up across global supply chains. – 2013. – URL: <https://ellenmacarthurfoundation.org> (дата обращения: 25.04.2025).
2. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., Hultink, E. J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 143. – P. 757–768. – doi:10.1016/j.jclepro.2016.12.048.
3. Велигура, А. В. Цифровые решения в экономике замкнутого цикла / А. В. Велигура // Инновации и информационные технологии в условиях цифровизации экономики: сб. тезисов II Междунар. науч.-практ. конф., Алчевск, 25–26 апр. 2024 г. – Алчевск: ДонГТУ, 2024. – С. 394–396. – EDN DZAEVN.
4. Велигура, А. В. Разработка комплекса моделей оценки и прогнозирования уровня социально-экономического развития субъектов Луганской Народной

Республики / А. В. Велигура // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2019. – № 9(27). – С. 48–55. – EDN KJGXND.

5. Велигура, А. В., Ивановская, М. В. Разработка информационной модели региона / А. В. Велигура, М. В. Ивановская // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2017. – № 1-2(3). – С. 146–149. – EDN ZUKBCV.

6. Рамазанов, С. К., Истомин, Л. Ф., Чмелев, В. В. Модели оценки и анализа сложных социально-экономических систем // В: Пономарёв, В. С., Клебанова, Т. С., Кизим, Н. А. (ред.). Модели оценки, анализа и прогнозирования социально-экономических систем. – Харьков: ИД «ИНЖЭК», 2013. – С. 425–439.

7. Резник, А. А., Рязанцева, Н. А. Методика оценки социально-экономического риска в регионе / А. А. Резник, Н. А. Рязанцева // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 5. – С. 151–153. – EDN GMRBMF.

Veligura A. V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lugansk State University named after Vladimir Dahl.

MATHEMATICAL MODEL OF THE FUNCTIONING OF A REGIONAL SOCIO-ECOLOGICAL-ECONOMIC SYSTEM IN THE CONTEXT OF THE CIRCULAR ECONOMY

Abstract: This paper presents a mathematical model of a region's socio-ecological-economic system operating within the framework of the circular economy. The model captures the interactions among seven key sectors of the Luhansk People's Republic economy—coal, metallurgy, mechanical engineering, chemical industry, agriculture, waste recycling, and energy—and their impact on the social and environmental subsystems. The model is based on systems of equations that describe resource and waste flows, environmental effects, and the social contribution of industries. Sector parameters and an integrated regional performance indicator are introduced. The study provides the foundation for implementing a computer-based model and conducting scenario analysis of sustainable regional development based on circular economy principles.

Key words: circular economy; socio-ecological-economic system; digitalization; mathematical modeling; sustainable development; region.