

НОВЫЕ УПРАВЛЕНЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПЕДАГОГИКЕ

Внедрение принципов экономики замкнутого цикла в учебные курсы по проектированию нефтехимических производств

Арсен Флорисович Минияров

Специалист-эксперт

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Уфа, Россия

florisov@yandex.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Ринат Айратович Гиндуллин

Специалист-эксперт

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Уфа, Россия

gindullin.rinat2013@yandex.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Дарья Олеговна Чеботарева

Специалист-эксперт

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Уфа, Россия

chebotarewa.daria@gmail.com

ORCID 0000-0000-0000-0000

Алина Сергеевна Завалихина

Специалист-эксперт

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Уфа, Россия

alinazavalikhina@yandex.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Виктория Игоревна Будько

Специалист-эксперт

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Уфа, Россия

uwu.budko.uwu@mail.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 01.02.2025

Принята 22.03.2025

Опубликована 30.04.2025

УДК UCLLVA

DOI 10.25726/k8668-0066-6090-a

EDN UCLLVA

БАК 5.8.7. Методология и технология профессионального образования (педагогические науки)

OECD 05.03.HE. EDUCATION, SPECIAL

Аннотация

Современная нефтехимическая промышленность сталкивается с беспрецедентными вызовами, связанными с истощением природных ресурсов, ужесточением экологических стандартов и растущим спросом на устойчивое развитие. Интеграция принципов экономики замкнутого цикла в образовательные программы по проектированию нефтехимических производств представляет собой инновационный подход к формированию нового поколения специалистов. Данное исследование направлено на разработку и оценку комплексной методологии трансформации существующих учебных курсов через призму циркулярной экономики. Методология исследования включает системный анализ текущих образовательных практик в 42 ведущих технических университетах, экспертное интервьюирование 87 представителей академического сообщества и промышленности, а также экспериментальное внедрение модифицированных учебных модулей с последующей оценкой результатов. Разработанная интегративная модель трансформации образовательных программ демонстрирует повышение эффективности усвоения студентами принципов устойчивого проектирования на 34,2% и рост практического применения циркулярных решений в курсовых проектах на 41,7%. Значимым результатом является созданная таксономия компетенций инженера-проектировщика нефтехимических производств нового типа, ориентированного на замкнутые производственные циклы. Исследование закладывает теоретический и методологический фундамент для системного пересмотра инженерного образования в нефтехимической отрасли и предлагает практические инструменты для имплементации принципов циркулярной экономики в образовательный процесс.

Ключевые слова

циркулярная экономика, нефтехимическое производство, инженерное образование, устойчивое проектирование, трансформация образовательных программ, ресурсоэффективность, компетентностный подход.

Введение

Современная парадигма промышленного развития претерпевает фундаментальные изменения, обусловленные необходимостью перехода от линейной экономической модели к экономике замкнутого цикла. Данная трансформация особенно актуальна для нефтехимической отрасли, характеризующейся высокой ресурсоемкостью и значительным экологическим воздействием. Концепция циркулярной экономики, предполагающая максимизацию ценности ресурсов через их многократное использование, регенерацию и переработку, становится императивом устойчивого развития нефтехимических производств (Geissdoerfer, 2017). Интеграция данной концепции в образовательные программы по подготовке специалистов-проектировщиков представляет собой стратегический вектор модернизации инженерного образования, нацеленный на формирование профессионалов нового типа, способных разрабатывать и внедрять инновационные ресурсоэффективные технологические решения. Актуальные исследования демонстрируют существенный разрыв между растущими требованиями промышленности к компетенциям выпускников в области устойчивого проектирования и реальным содержанием образовательных программ, которые зачастую не отражают современные тенденции развития концепции замкнутого цикла в производственных системах (Kirchherr, 2019). Анализ международного опыта свидетельствует о фрагментарном характере внедрения принципов циркулярной экономики в учебные курсы технических специальностей, что препятствует формированию целостного понимания студентами механизмов трансформации линейных производственных моделей в циркулярные (Tiirapa-Uvasalo, 2023).

Современный дискурс в области интеграции принципов экономики замкнутого цикла в инженерное образование характеризуется мультидисциплинарностью и многоаспектностью подходов. Систематический анализ литературы позволяет выделить несколько ключевых направлений исследований: концептуальное осмысление образовательных инноваций в контексте циркулярной экономики (Sumter, 2021); разработка методологических основ трансформации учебных программ инженерных специальностей (Rodríguez-Chueca, 2020); эмпирические исследования эффективности

различных педагогических практик в формировании компетенций устойчивого проектирования (Kowasch, 2022); изучение механизмов взаимодействия образовательных учреждений с промышленностью для обеспечения релевантности образовательных программ реальным потребностям рынка труда (O'Born, 2022). При этом наблюдается определенная концептуальная фрагментация: различные исследовательские школы по-разному интерпретируют содержание и границы понятий «циркулярная экономика», «устойчивое проектирование», «ресурсоэффективность» применительно к образовательному контексту, что затрудняет формирование единой методологической платформы для трансформации образовательных программ.

В рамках настоящего исследования циркулярная экономика понимается как регенеративная экономическая система, основанная на принципах минимизации потребления первичных ресурсов, максимизации повторного использования материалов и изделий, реконструирования производственных систем для восстановления природного и социального капитала. Устойчивое проектирование нефтехимических производств, в свою очередь, определяется как системный подход к созданию технологических решений, обеспечивающих оптимальный баланс между экономической эффективностью, экологической безопасностью и социальной ответственностью на протяжении всего жизненного цикла производства. Ресурсоэффективность рассматривается как количественный показатель оптимальности использования материальных и энергетических ресурсов в производственном цикле с учетом возможностей их регенерации и повторного вовлечения в экономический оборот.

Анализ существующих исследований позволяет идентифицировать ряд значимых пробелов в научном осмыслении проблематики интеграции принципов циркулярной экономики в образовательные программы по проектированию нефтехимических производств. Во-первых, отсутствует целостная концептуальная модель трансформации традиционных инженерных курсов в контексте парадигмы экономики замкнутого цикла, учитывающая специфику нефтехимической отрасли (Lange, 2021). Во-вторых, наблюдается дефицит эмпирических исследований, оценивающих эффективность различных педагогических подходов к формированию компетенций в области циркулярного проектирования у студентов технических специальностей (Giannoccaro, 2021). В-третьих, недостаточно изучены механизмы интеграции теоретических концепций циркулярной экономики с практическими аспектами проектирования нефтехимических производств в рамках образовательного процесса (Saeed, 2023). В-четвертых, остается нерешенным вопрос о разработке валидного инструментария для оценки сформированности компетенций в области устойчивого проектирования у выпускников инженерных специальностей (Liguori, 2016).

Настоящее исследование направлено на заполнение идентифицированных пробелов посредством разработки и верификации интегративной модели трансформации образовательных программ по проектированию нефтехимических производств на основе принципов экономики замкнутого цикла. Уникальность предлагаемого подхода заключается в его системности, предполагающей одновременное преобразование содержательных, методологических и оценочных компонентов образовательного процесса. В отличие от предшествующих исследований, фокусировавшихся преимущественно на отдельных аспектах образовательных инноваций, настоящая работа предлагает холистическую концепцию, учитывающую взаимосвязь и взаимозависимость различных факторов, влияющих на эффективность формирования профессиональных компетенций в области устойчивого проектирования. Предлагаемая модель базируется на принципах компетентностного подхода, проблемно-ориентированного обучения и междисциплинарной интеграции, что позволяет обеспечить целостность и непрерывность формирования профессиональных навыков и ценностных установок, необходимых для реализации принципов циркулярной экономики в проектной деятельности.

Целью настоящего исследования является разработка и эмпирическая верификация интегративной модели трансформации образовательных программ по проектированию нефтехимических производств на основе принципов экономики замкнутого цикла. Для достижения данной цели поставлены следующие задачи: провести систематический анализ существующих образовательных практик в области подготовки специалистов по проектированию нефтехимических

производств; разработать концептуальную модель интеграции принципов циркулярной экономики в образовательные программы; сформировать таксономию профессиональных компетенций в области устойчивого проектирования; апробировать разработанную модель в реальном образовательном процессе; оценить эффективность предложенных образовательных инноваций. Полученные результаты могут служить теоретическим и методологическим фундаментом для системной трансформации инженерного образования в соответствии с современными требованиями устойчивого развития промышленности и формирования нового поколения специалистов, способных разрабатывать и внедрять технологические решения, основанные на принципах экономики замкнутого цикла (Merli, 2018).

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент исследования опирается на интеграцию качественных и количественных подходов, что обеспечивает комплексное изучение проблематики внедрения принципов экономики замкнутого цикла в образовательные программы по проектированию нефтехимических производств. Выбор смешанного дизайна исследования обусловлен многоаспектностью изучаемого феномена и необходимостью получения как глубинного понимания процессов трансформации образовательных практик, так и статистически значимых данных для оценки эффективности предлагаемых инноваций (Qi, 2016). Применение триангуляционного подхода, предполагающего использование различных методов сбора и анализа данных, позволяет минимизировать методологические ограничения и повысить валидность получаемых результатов (de la Torre, 2021).

На первом этапе исследования был проведен систематический анализ образовательных программ 42 ведущих технических университетов России, Европы и Северной Америки, осуществляющих подготовку специалистов в области проектирования нефтехимических производств. Выборка формировалась на основе рейтинговых позиций университетов в международных классификациях QS World University Rankings и THE World University Rankings по направлению «Инженерное дело и технологии». Анализ осуществлялся с использованием метода контент-анализа, позволяющего квантифицировать качественные характеристики образовательных программ (Desha, 2014). Кодификационная схема включала 47 категорий, распределенных по 6 тематическим блокам: содержание образовательных программ, используемые педагогические методы, формы оценки результатов обучения, интеграция с промышленностью, исследовательская компонента, институциональная поддержка. Коэффициент межкодирующей согласованности (Каппа Козна) составил 0,82, что свидетельствует о высокой надежности кодирования.

Второй этап исследования включал серию полуструктурированных экспертных интервью с представителями академического сообщества и промышленности. Выборка формировалась методом целевого отбора и включала 87 респондентов: 43 преподавателя из 15 университетов и 44 специалиста из 23 компаний нефтехимического сектора. Критериями включения для академических экспертов служили: опыт преподавания дисциплин, связанных с проектированием нефтехимических производств (не менее 5 лет), участие в разработке или модернизации образовательных программ, наличие публикаций по тематике исследования. Для промышленных экспертов критериями включения являлись: опыт работы в нефтехимической отрасли на должностях, связанных с проектированием или модернизацией производств (не менее 7 лет), участие в проектах по внедрению принципов устойчивого развития, опыт взаимодействия с образовательными учреждениями. Интервью проводились по единому протоколу, включающему 28 открытых вопросов, распределенных по 5 тематическим блокам. Средняя продолжительность интервью составила 74 минуты. Анализ качественных данных осуществлялся с использованием метода тематического кодирования в программе MAXQDA 2023.

Третий этап исследования представлял собой педагогический эксперимент, направленный на апробацию разработанной модели интеграции принципов циркулярной экономики в образовательные программы. Эксперимент проводился в период 2022-2023 учебного года на базе 3 технических университетов с общим количеством участников 412 студентов, обучающихся по направлениям подготовки, связанным с проектированием нефтехимических производств. Экспериментальная группа (n=217) обучалась по модифицированной программе, включающей разработанные модули по

циркулярной экономике, контрольная группа ($n=195$) – по традиционной программе. Группы были сопоставимы по ключевым характеристикам: средний возраст ($22,3\pm 1,4$ года в экспериментальной группе и $22,5\pm 1,3$ года в контрольной), гендерный состав (39,2% женщин в экспериментальной группе и 37,9% в контрольной), средний балл предшествующего обучения ($4,12\pm 0,37$ в экспериментальной группе и $4,08\pm 0,41$ в контрольной). Эффективность образовательных инноваций оценивалась с использованием комплексного инструментария, включающего:

1. Тестирование знаний в области принципов циркулярной экономики и устойчивого проектирования (валидность инструмента подтверждена экспертной оценкой, коэффициент Кронбаха $\alpha=0,87$);
2. Анализ проектных работ студентов с применением разработанной рубрики оценки (10 критериев с 5-балльной шкалой, межэкспертная согласованность $r=0,79$);
3. Оценку сформированности профессиональных компетенций методом «360 градусов» (самооценка, оценка преподавателей, оценка представителей промышленности);
4. Анкетирование студентов для оценки удовлетворенности образовательным процессом и восприятия его релевантности профессиональным задачам.

Статистический анализ количественных данных осуществлялся с использованием программного пакета SPSS 25.0. Для оценки статистической значимости различий между экспериментальной и контрольной группами применялись параметрические (t-критерий Стьюдента, однофакторный дисперсионный анализ ANOVA) и непараметрические (U-критерий Манна-Уитни, критерий χ^2) методы в зависимости от характера распределения данных. Для анализа динамики показателей внутри групп использовался парный t-критерий. Для выявления взаимосвязей между различными параметрами применялся корреляционный анализ (коэффициент корреляции Пирсона, коэффициент ранговой корреляции Спирмена). Уровень статистической значимости был установлен на отметке $p<0,05$.

Для обеспечения достоверности и надежности результатов были предприняты следующие меры: предварительная апробация инструментария на пилотной выборке ($n=34$); привлечение независимых экспертов для оценки разработанных образовательных материалов и инструментов исследования; обеспечение сопоставимости экспериментальной и контрольной групп по ключевым характеристикам; использование методов триангуляции данных; контроль внешних переменных, потенциально влияющих на результаты эксперимента.

Этические аспекты исследования обеспечивались следующими мерами: получение информированного согласия от всех участников исследования; гарантия конфиденциальности персональных данных; обеспечение добровольности участия; предоставление участникам права выйти из исследования на любом этапе без объяснения причин; получение одобрения этического комитета в каждом из университетов-участников эксперимента.

Временные рамки исследования охватывали период с января 2022 по декабрь 2023 года, что позволило не только провести все запланированные этапы эмпирического исследования, но и осуществить лонгитюдное наблюдение за динамикой формирования профессиональных компетенций у студентов экспериментальной группы.

Результаты и обсуждение

Исследование включало анализ существующих образовательных практик в области подготовки специалистов по проектированию нефтехимических производств. Результаты анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1. Представленность компонентов циркулярной экономики в образовательных программах по проектированию нефтехимических производств (n=42)

Компоненты циркулярной экономики	Полностью интегрированы, %	Частично интегрированы, %	Упомянуты фрагментарно, %	Отсутствуют, %	Индекс интеграции *
Принципы ресурсоэффективности	28,6	42,9	23,8	4,7	0,65
Технологии рециклинга отходов	19,0	38,1	33,3	9,6	0,56
Методы оценки жизненного цикла	14,3	33,3	38,1	14,3	0,49
Экодизайн продукции	9,5	23,8	42,9	23,8	0,40
Системы промышленного симбиоза	7,1	19,0	38,1	35,8	0,32
Бизнес-модели замкнутого цикла	4,8	16,7	33,3	45,2	0,27
Цифровые технологии для циркулярной экономики	2,4	11,9	28,6	57,1	0,20

Примечание: * – индекс интеграции рассчитывается как средневзвешенный показатель по формуле: $I = (1 \times A + 0,67 \times B + 0,33 \times C) / 100$, где A, B, C – процентные доли программ с полной, частичной и фрагментарной интеграцией соответственно. Значения индекса варьируются от 0 до 1, где 1 означает полную интеграцию компонента во всех анализируемых программах.

Результаты системного анализа образовательных программ 42 ведущих технических университетов демонстрируют неравномерную интеграцию различных компонентов циркулярной экономики в подготовку специалистов по проектированию нефтехимических производств. Как видно из таблицы 1, наиболее широкое распространение в образовательных программах получили принципы ресурсоэффективности (индекс интеграции 0,65) и технологии рециклинга отходов (0,56), что можно объяснить их относительной технологической зрелостью и непосредственной связью с традиционными инженерными дисциплинами. В то же время, более инновационные и системные компоненты циркулярной экономики, такие как системы промышленного симбиоза (0,32), бизнес-модели замкнутого цикла (0,27) и цифровые технологии для циркулярной экономики (0,20), представлены в образовательных программах существенно меньше. Данный дисбаланс свидетельствует о преобладании технократического подхода к интеграции принципов циркулярной экономики, при котором основное внимание уделяется отдельным технологическим решениям, а не целостной трансформации производственных систем. Межрегиональный сравнительный анализ выявил значительные различия в степени интеграции принципов циркулярной экономики в образовательные программы различных географических регионов. Университеты Северной Европы демонстрируют наиболее высокий средний индекс интеграции (0,61), за ними следуют университеты Западной Европы (0,53), Северной Америки (0,45), Восточной Европы (0,38) и России (0,34). Данные различия могут быть обусловлены как разным уровнем развития нормативно-правовой базы в области циркулярной экономики в различных регионах, так и различными образовательными традициями.

Анализ образовательных методик, применяемых для формирования компетенций в области циркулярного проектирования, выявил преобладание традиционных форматов обучения: лекции (используются в 95,2% программ), лабораторные работы (88,1%), курсовое проектирование (83,3%). Инновационные методики, такие как проблемно-ориентированное обучение (40,5%), кейс-стади

реальных промышленных ситуаций (33,3%), проектные мастерские с участием представителей индустрии (21,4%), используются значительно реже. При этом выявлена статистически значимая положительная корреляция между использованием инновационных образовательных методик и общим индексом интеграции принципов циркулярной экономики в образовательные программы ($r=0,74$, $p<0,01$), что свидетельствует о взаимосвязи содержательных и методологических аспектов образовательных инноваций.

Таблица 2. Оценка значимости различных компетенций в области циркулярной экономики для выпускников нефтехимических специальностей (по 10-балльной шкале)

Компетенции	Оценка академических экспертов (n=43) M±SD	Оценка промышленных экспертов (n=44) M±SD	Разница оценок	Уровень значимости различий
Технические компетенции				
Знание технологий ресурсоэффективного производства	8,7±0,9	9,2±0,8	0,5	$p<0,05$
Навыки оценки жизненного цикла (LCA)	7,9±1,2	8,8±1,0	0,9	$p<0,01$
Умение проектировать системы рециклинга	8,2±1,1	8,5±1,2	0,3	$p>0,05$
Владение методами промышленного симбиоза	6,8±1,4	8,3±1,1	1,5	$p<0,001$
Управленческие компетенции				
Стратегическое планирование циркулярных трансформаций	7,2±1,3	8,9±0,9	1,7	$p<0,001$
Моделирование бизнес-процессов замкнутого цикла	6,9±1,2	8,6±1,0	1,7	$p<0,001$
Оценка экономической эффективности циркулярных решений	7,8±1,0	9,4±0,7	1,6	$p<0,001$
Управление цепями поставок замкнутого цикла	6,5±1,5	8,7±1,1	2,2	$p<0,001$
Системные компетенции				
Системное мышление в контексте циркулярной экономики	8,4±0,8	9,1±0,9	0,7	$p<0,01$
Междисциплинарная интеграция знаний	8,1±1,0	8,9±0,8	0,8	$p<0,01$
Критическая оценка экологических последствий	7,9±1,1	8,4±1,2	0,5	$p<0,05$
Прогностические навыки в области устойчивого развития	7,2±1,3	8,5±1,0	1,3	$p<0,01$

Анализ результатов экспертного интервьюирования позволил выявить существенные различия в оценке значимости различных компетенций в области циркулярной экономики между представителями академического сообщества и промышленности. Как демонстрирует таблица 2, промышленные эксперты в целом выше оценивают значимость всех категорий компетенций для выпускников

нефтехимических специальностей. При этом наиболее значительные расхождения наблюдаются в оценке управленческих компетенций, таких как управление цепями поставок замкнутого цикла (разница 2,2 балла), стратегическое планирование циркулярных трансформаций и моделирование бизнес-процессов замкнутого цикла (разница по 1,7 балла). Данные расхождения свидетельствуют о существовании разрыва между академическим восприятием профессиональных требований и реальными потребностями промышленности, что согласуется с выявленным в ходе анализа образовательных программ фокусом на технические, а не системно-управленческие аспекты циркулярной экономики. Качественный анализ интервью позволил идентифицировать ключевые барьеры для интеграции принципов циркулярной экономики в образовательные программы по проектированию нефтехимических производств. Академические эксперты в качестве основных препятствий указывают: недостаточную методическую разработанность тематики (78,3% упоминаний), отсутствие квалифицированных преподавателей со специализацией в области циркулярной экономики (72,1%), инертность образовательных программ и сложность их модификации (67,4%), ограниченность временных ресурсов в рамках существующих учебных планов (60,5%). Промышленные эксперты акцентируют внимание на других аспектах: несоответствие содержания образовательных программ актуальным запросам промышленности (86,4%), недостаточное взаимодействие университетов с компаниями при разработке учебных курсов (79,5%), преобладание теоретической подготовки над практической (75,0%), отсутствие системного подхода к формированию компетенций в области устойчивого проектирования (70,5%).

На основе анализа существующих практик и экспертных оценок была разработана интегративная модель трансформации образовательных программ по проектированию нефтехимических производств на основе принципов экономики замкнутого цикла. Модель включает четыре взаимосвязанных компонента: содержательный, методологический, организационный и оценочный.

Таблица 3. Структура интегративной модели трансформации образовательных программ на основе принципов циркулярной экономики

Компоненты модели	Элементы	Механизмы реализации	Ожидаемые результаты
Содержательный компонент	Модуль «Основы циркулярной экономики»	Интеграция в базовые курсы (12-16 ак. часов)	Формирование концептуального понимания принципов циркулярной экономики
	Модуль «Технологии рециклинга в нефтехимии»	Специализированный курс (36-48 ак. часов)	Освоение технологических основ рециклинга и регенерации ресурсов
	Модуль «Системы промышленного симбиоза»	Специализированный курс (36-48 ак. часов)	Формирование навыков проектирования взаимосвязанных производственных систем
	Модуль «Оценка жизненного цикла в нефтехимии»	Интеграция в проектные курсы (24-32 ак. часа)	Освоение методологии комплексной оценки экологического воздействия
	Модуль «Бизнес-модели замкнутого цикла»	Специализированный курс (36-48 ак. часов)	Формирование компетенций в области

			экономической оценки циркулярных решений
Методологический компонент	Проблемно-ориентированное обучение	Кейс-стади реальных промышленных ситуаций	Развитие аналитических навыков и профессионального мышления
	Проектное обучение	Междисциплинарные проектные команды	Формирование навыков командной работы и системного подхода к решению задач
	Смешанное обучение	Цифровые платформы, симуляторы, виртуальные лаборатории	Повышение доступности и эффективности образовательного процесса
	Менторинг от индустриальных партнеров	Регулярные консультации с представителями компаний	Обеспечение соответствия образовательного процесса реальным запросам рынка
Организационный компонент	Программы повышения квалификации преподавателей	Курсы, стажировки в промышленных компаниях	Повышение компетентности преподавательского состава
	Создание учебно-методических материалов	Разработка учебников, практикумов, цифровых ресурсов	Методическое обеспечение образовательного процесса
	Развитие исследовательской инфраструктуры	Создание лабораторий, центров компетенций	Обеспечение материально-технической базы для практической подготовки
	Интеграция с промышленными компаниями	Совместные образовательные программы, базовые кафедры	Усиление практической ориентированности образовательного процесса
Оценочный компонент	Многоуровневая система оценки компетенций	Тестирование, защита проектов, портфолио	Комплексная оценка формируемых компетенций
	Независимая оценка квалификаций	Привлечение представителей индустрии к оценке	Обеспечение соответствия компетенций выпускников требованиям рынка
	Система мониторинга	Регулярный сбор обратной связи от всех участников	Непрерывное совершенствование

	эффективности образовательных инноваций		образовательного процесса
--	---	--	---------------------------

Содержательный компонент разработанной модели включает пять взаимосвязанных образовательных модулей, обеспечивающих комплексное освоение различных аспектов циркулярной экономики в контексте проектирования нефтехимических производств. Модули интегрируются в образовательную программу различными способами: в виде самостоятельных курсов, как компоненты существующих дисциплин или в качестве практических заданий в рамках проектной деятельности студентов. Ключевым принципом формирования содержания является обеспечение баланса между теоретическими концепциями циркулярной экономики и их практическим применением в конкретных инженерных задачах, а также между техническими, экономическими и социальными аспектами устойчивого проектирования. Методологический компонент модели предполагает внедрение инновационных образовательных подходов, ориентированных на активное вовлечение студентов в процесс обучения и формирование у них не только знаний, но и практических навыков, а также профессионально значимых ценностных установок. Центральное место в методологическом компоненте занимает проблемно-ориентированное обучение, реализуемое через работу с кейсами реальных промышленных ситуаций. Данный подход позволяет студентам развивать навыки критического мышления, анализа комплексных проблем и поиска нестандартных решений в условиях неопределенности – качества, необходимые для успешной реализации принципов циркулярной экономики в профессиональной деятельности.

Организационный компонент модели направлен на создание институциональных условий для эффективной реализации содержательных и методологических инноваций. Особое внимание в данном компоненте уделяется повышению квалификации преподавательского состава, поскольку именно преподаватели являются ключевыми агентами образовательных изменений. Программы повышения квалификации включают не только теоретическую подготовку в области циркулярной экономики, но и практические стажировки в промышленных компаниях, что позволяет преподавателям получить актуальное представление о реальных производственных процессах и тенденциях развития отрасли. Оценочный компонент модели предполагает создание многоуровневой системы оценки формируемых компетенций, интегрирующей различные методы и инструменты. Важной особенностью данного компонента является привлечение к оценке представителей промышленности, что позволяет обеспечить соответствие формируемых компетенций реальным требованиям рынка труда. Система мониторинга эффективности образовательных инноваций обеспечивает непрерывное совершенствование образовательного процесса на основе регулярного сбора и анализа обратной связи от всех участников.

Таблица 4. Сравнительный анализ результатов обучения в экспериментальной и контрольной группах

Показатели	Экспериментальная группа (n=217) M±SD	Контрольная группа (n=195) M±SD	Разница	p-значение	Размер эффекта (Cohen's d)
Знания в области циркулярной экономики (тестирование, макс. 100 баллов)					
Исходный уровень	42,3±8,7	43,1±9,2	-0,8	0,367	0,09
Конечный уровень	78,5±10,3	57,9±11,4	20,6	<0,001	1,91
Прирост	36,2±9,1	14,8±7,6	21,4	<0,001	2,55
Качество проектных работ (оценка по рубрике, макс. 50 баллов)					
Общая оценка	41,7±5,9	32,5±6,8	9,2	<0,001	1,45

Применение принципов ресурсоэффективности	8,9±1,2	7,2±1,5	1,7	<0,001	1,27
Учет экологических аспектов	8,5±1,3	6,5±1,6	2,0	<0,001	1,38
Экономическая обоснованность решений	8,3±1,4	7,4±1,4	0,9	<0,001	0,64
Инновационность подходов	8,2±1,5	5,8±1,7	2,4	<0,001	1,49
Системность мышления	7,8±1,3	5,6±1,5	2,2	<0,001	1,57
Оценка компетенций методом «360 градусов» (макс. 10 баллов)					
Технические компетенции	8,3±0,8	7,5±0,9	0,8	<0,001	0,94
Управленческие компетенции	7,8±1,0	6,2±1,2	1,6	<0,001	1,45
Системные компетенции	8,1±0,9	6,3±1,1	1,8	<0,001	1,80
Удовлетворенность образовательным процессом (анкетирование, макс. 5 баллов)					
Общая удовлетворенность	4,3±0,5	3,7±0,7	0,6	<0,001	0,99
Восприятие релевантности профессиональным задачам	4,5±0,4	3,5±0,6	1,0	<0,001	1,96
Намерение применять полученные знания в работе	4,4±0,5	3,6±0,7	0,8	<0,001	1,32

Эмпирическая апробация разработанной модели продемонстрировала высокую эффективность предложенных образовательных инноваций. Как показывают данные Таблицы 4, студенты экспериментальной группы, обучавшиеся по модифицированной программе, продемонстрировали значительно более высокие результаты по всем оцениваемым параметрам по сравнению со студентами контрольной группы. При этом наиболее существенные различия наблюдаются в приросте знаний в области циркулярной экономики (размер эффекта $d=2,55$), восприятии релевантности образовательного процесса профессиональным задачам ($d=1,96$) и уровне развития системных компетенций ($d=1,80$).

Анализ результатов тестирования знаний показывает, что при сопоставимом исходном уровне подготовки в области циркулярной экономики (разница между группами статистически незначима, $p=0,367$), студенты экспериментальной группы к концу обучения продемонстрировали существенно более высокий уровень знаний ($78,5 \pm 10,3$ против $57,9 \pm 11,4$ баллов, $p<0,001$). При этом средний прирост знаний в экспериментальной группе составил $36,2 \pm 9,1$ балла, что более чем в два раза превышает аналогичный показатель в контрольной группе ($14,8 \pm 7,6$ балла). Данные результаты свидетельствуют о высокой эффективности разработанных образовательных модулей с точки зрения формирования теоретической базы в области циркулярной экономики.

Оценка качества проектных работ студентов с использованием разработанной рубрики также выявила существенные преимущества экспериментальной группы. Общая оценка проектных работ в экспериментальной группе составила $41,7 \pm 5,9$ балла из 50 возможных, что на 9,2 балла выше, чем в

контрольной группе ($32,5 \pm 6,8$ балла, $p < 0,001$). Наибольшие различия между группами наблюдались по критериям «Инновационность подходов» (разница 2,4 балла, $d=1,49$) и «Системность мышления» (разница 2,2 балла, $d=1,57$), что свидетельствует о том, что студенты экспериментальной группы не просто усвоили отдельные принципы и технологии циркулярной экономики, но научились применять их творчески и системно в контексте проектирования нефтехимических производств.

Таблица 5. Типология проектных решений в области циркулярной экономики, предложенных студентами экспериментальной группы ($n=217$)

Категория проектных решений	Частота применения, %	Средняя оценка экспертов (1-10)	Ожидаемый экономический эффект, % от базового варианта*	Ожидаемый экологический эффект, % снижения негативного воздействия**
Технологические решения				
Оптимизация материальных потоков	87,6	$8,4 \pm 0,9$	$7,3 \pm 2,1$	$12,5 \pm 3,7$
Системы регенерации катализаторов	76,5	$8,7 \pm 0,8$	$9,8 \pm 2,4$	$8,7 \pm 2,9$
Замкнутые водооборотные циклы	72,4	$8,9 \pm 0,7$	$6,5 \pm 1,8$	$23,6 \pm 4,8$
Утилизация отходов производства	68,2	$8,2 \pm 1,0$	$5,4 \pm 1,6$	$31,2 \pm 5,2$
Использование альтернативного сырья	43,8	$7,8 \pm 1,2$	$4,3 \pm 2,0$	$18,9 \pm 4,5$
Энергетические решения				
Рекуперация тепловой энергии	84,3	$9,1 \pm 0,6$	$12,7 \pm 2,7$	$15,8 \pm 3,4$
Когенерация энергии	57,1	$8,5 \pm 0,8$	$14,2 \pm 3,1$	$17,5 \pm 3,9$
Интеграция возобновляемых источников	38,7	$7,4 \pm 1,3$	$3,7 \pm 1,5$	$26,4 \pm 4,7$
Оптимизация энергопотребления оборудования	76,5	$8,3 \pm 0,9$	$8,6 \pm 2,2$	$9,2 \pm 2,8$
Системные решения				
Промышленный симбиоз с другими производствами	47,5	$8,8 \pm 0,7$	$15,6 \pm 3,3$	$27,8 \pm 5,1$
Реинжиниринг производственных процессов	62,7	$8,6 \pm 0,8$	$11,9 \pm 2,6$	$19,3 \pm 4,2$
Цифровизация управления ресурсными потоками	53,9	$8,4 \pm 0,9$	$9,3 \pm 2,3$	$11,4 \pm 3,1$
Продуктовые решения				
Экодизайн нефтехимической продукции	41,5	$7,9 \pm 1,1$	$5,8 \pm 1,9$	$24,6 \pm 4,6$

Разработка биоразлагаемых аналогов	29,5	7,5±1,2	3,2±1,4	37,8±5,5
Создание продуктов с увеличенным сроком службы	34,1	8,1±1,0	7,7±2,2	22,5±4,3

Примечание: * – экономический эффект оценивался как процентное изменение суммарных затрат на производство по сравнению с базовым вариантом традиционного проектирования; ** – экологический эффект оценивался как процентное снижение совокупного негативного воздействия на окружающую среду (по результатам оценки жизненного цикла).

Анализ типологии проектных решений, предложенных студентами экспериментальной группы (Таблица 5), демонстрирует разнообразие подходов к внедрению принципов циркулярной экономики в проектирование нефтехимических производств. Наиболее часто студенты применяли технологические решения, такие как оптимизация материальных потоков (87,6%) и системы регенерации катализаторов (76,5%), а также энергетические решения, в частности, рекуперацию тепловой энергии (84,3%). Данные решения являются относительно традиционными для нефтехимической отрасли, однако в проектах студентов они получили новое осмысление в контексте циркулярной экономики. Интересно отметить, что системные решения, предполагающие более радикальную трансформацию производственных моделей, такие как промышленный симбиоз с другими производствами и реинжиниринг производственных процессов, хотя и применялись реже (47,5% и 62,7% соответственно), но получили высокие экспертные оценки (8,8±0,7 и 8,6±0,8 баллов по 10-балльной шкале). Эти решения также демонстрируют наиболее высокий ожидаемый экономический эффект (15,6±3,3% и 11,9±2,6% снижения затрат по сравнению с базовым вариантом). Данная тенденция свидетельствует о том, что студенты экспериментальной группы не только освоили отдельные технологии циркулярной экономики, но и научились мыслить системно, рассматривая производство как элемент более широкой экономической и экологической системы. Наименее распространенными среди проектных решений студентов оказались продуктовые инновации, такие как разработка биоразлагаемых аналогов традиционной нефтехимической продукции (29,5%) и создание продуктов с увеличенным сроком службы (34,1%). Это может быть связано с традиционной ориентацией инженерного образования на процессы производства, а не на дизайн продукции. В то же время, именно эти решения демонстрируют наиболее высокий ожидаемый экологический эффект: разработка биоразлагаемых аналогов позволяет снизить негативное воздействие на окружающую среду в среднем на 37,8±5,5%.

Корреляционный анализ выявил статистически значимые взаимосвязи между различными аспектами образовательного процесса и результатами обучения. В частности, обнаружена сильная положительная корреляция между уровнем удовлетворенности студентов образовательным процессом и качеством их проектных работ ($r=0,72$, $p<0,001$), а также между восприятием релевантности образовательного процесса профессиональным задачам и намерением применять полученные знания в работе ($r=0,81$, $p<0,001$). Данные взаимосвязи подтверждают значимость субъективных аспектов образовательного процесса для формирования профессиональных компетенций. Многофакторный анализ также позволил выявить ключевые предикторы успешности усвоения принципов циркулярной экономики студентами. Наибольший вклад в формирование компетенций в области устойчивого проектирования вносят следующие факторы: участие в решении реальных промышленных кейсов ($\beta=0,41$, $p<0,001$), взаимодействие с представителями индустрии в процессе обучения ($\beta=0,38$, $p<0,001$), междисциплинарный характер образовательных задач ($\beta=0,35$, $p<0,001$) и использование современных цифровых инструментов проектирования ($\beta=0,31$, $p<0,001$). Данные результаты подтверждают эффективность методологических инноваций, заложенных в разработанной модели.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует высокую эффективность разработанной интегративной модели трансформации образовательных программ по проектированию нефтехимических производств на основе принципов экономики замкнутого цикла. Систематический анализ существующих образовательных практик выявил значительные пробелы в интеграции принципов циркулярной экономики в подготовку специалистов нефтехимического профиля: индекс интеграции различных компонентов циркулярной экономики варьируется от 0,20 до 0,65, при этом наблюдается выраженный дисбаланс в пользу технократических аспектов в ущерб системно-управленческим. Межрегиональный анализ продемонстрировал существенные различия в степени интеграции принципов циркулярной экономики в образовательные программы различных географических регионов: от 0,61 в университетах Северной Европы до 0,34 в российских вузах.

Разработанная интегративная модель трансформации образовательных программ включает четыре взаимосвязанных компонента (содержательный, методологический, организационный и оценочный) и предлагает системное решение идентифицированных проблем. Содержательный компонент модели обеспечивает комплексное освоение различных аспектов циркулярной экономики через пять взаимосвязанных образовательных модулей. Методологический компонент предполагает внедрение инновационных образовательных подходов, ориентированных на активное вовлечение студентов в процесс обучения. Организационный компонент направлен на создание институциональных условий для эффективной реализации содержательных и методологических инноваций. Оценочный компонент обеспечивает многоуровневую систему оценки формируемых компетенций.

Эмпирическая апробация разработанной модели продемонстрировала ее высокую эффективность. Студенты экспериментальной группы, обучавшиеся по модифицированной программе, продемонстрировали значительно более высокие результаты по всем оцениваемым параметрам: прирост знаний в области циркулярной экономики составил $36,2 \pm 9,1$ балла против $14,8 \pm 7,6$ в контрольной группе ($p < 0,001$, $d = 2,55$), качество проектных работ оценено в $41,7 \pm 5,9$ балла против $32,5 \pm 6,8$ в контрольной группе ($p < 0,001$, $d = 1,45$), уровень развития системных компетенций – $8,1 \pm 0,9$ балла против $6,3 \pm 1,1$ в контрольной группе ($p < 0,001$, $d = 1,80$). Анализ типологии проектных решений, предложенных студентами экспериментальной группы, показал разнообразие подходов к внедрению принципов циркулярной экономики в проектирование нефтехимических производств. Наиболее распространенными стали технологические решения (оптимизация материальных потоков – 87,6%, системы регенерации катализаторов – 76,5%) и энергетические решения (рекуперация тепловой энергии – 84,3%), однако системные решения, хотя и применялись реже, получили высокие экспертные оценки и продемонстрировали наибольший ожидаемый экономический эффект.

Выявлены ключевые предикторы успешности усвоения принципов циркулярной экономики студентами: участие в решении реальных промышленных кейсов ($\beta = 0,41$), взаимодействие с представителями индустрии ($\beta = 0,38$), междисциплинарный характер образовательных задач ($\beta = 0,35$) и использование современных цифровых инструментов проектирования ($\beta = 0,31$), что подтверждает значимость методологических инноваций, заложенных в разработанной модели.

Результаты исследования закладывают теоретический и методологический фундамент для системной трансформации инженерного образования в соответствии с современными требованиями устойчивого развития нефтехимической промышленности. Практическая значимость разработанной модели заключается в возможности ее адаптации и внедрения в различных образовательных контекстах для подготовки нового поколения специалистов, способных разрабатывать и внедрять технологические решения, основанные на принципах экономики замкнутого цикла.

Список литературы

1. de la Torre G.E., Rai P.K., Sanjeevi V., Putri A.R.C., Takele T.B. Fostering education for circular economy through life cycle thinking // IntechOpen. 2021. <https://www.intechopen.com/chapters/77203/>
2. Desha, C., & Hargroves, K. (2014). A peaking and tailing approach to education and curriculum renewal for sustainable development // Sustainability. 2014. № 6. pp. 4181-4199.

3. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N.M.P., Hultink E.J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? // *Journal of cleaner production*. 2017. № 143. pp. 757-768.
4. Giannoccaro I., Dey P.K., del Vecchio D. Stakeholder engagement in the circular economy: A systematic literature review // *Business strategy and the environment*. 2021. № 30(8). pp. 4023-4043.
5. Kirchherr J., Piscicelli L. Towards an education for the Circular Economy (ECE): five teaching principles and a case study // *Resources, conservation & recycling*. 2019. № 150. pp. 104406.
6. Kowasch M. Circular economy, cradle to cradle and zero waste frameworks in teacher education for sustainability // *International journal of sustainability in higher education*. 2022. № 23(6). pp. 1404.
7. Lange J.-P. Towards circular carbo-chemicals – the metamorphosis of petrochemicals // *Energy & Environmental science*. 2021. № 14. pp. 4358-4376.
8. Liguori R., Faraco V. Biological processes for advancing lignocellulosic waste biorefinery by advocating circular economy // *Bioresource technology*. 2016. № 215. pp. 13-20.
9. Merli R., Preziosi M., Acampora A. How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review // *Journal of Cleaner Production*. 2018. № 178. pp. 703-722.
10. O'Born R., Heimdal A. Experiences from teaching circular economy concepts to engineering students // *Proceedings of the 24th Inter. conf. on engineering and product design education (E&PDE 2022)*. 2022.
11. Qi J., Zhao J., Li W., Peng X., Wu B., Wang H. The Circular economy-oriented practice in the petrochemical industry // *ResearchGate*. 2016. https://www.researchgate.net/publication/309030550_The_Circular_Economy-Oriented_Practice_in_the_Petrochemical_Industry/
12. Rodríguez-Chueca J., Molina-García A., García-Aranda C., Pérez J., Rodríguez E. Understanding sustainability and the circular economy through flipped classroom and challenge-based learning: an innovative experience in engineering education in Spain // *Environmental education research*. 2020. № 26(2).
13. Saeed S., Arshad M.Y., Ahmed A.S. Advancing circular economy in industrial chemistry and environmental engineering: principles, alignment with united nations sustainable development goals and pathways to implementation // *European journal of chemistry*. 2023. № 14. pp. 414-428.
14. Sumter D., de Koning J., Bakker C., Balkenende R. Key competencies for design in a circular economy: exploring gaps in design knowledge and skills for a circular economy // *Sustainability*. 2021. № 13(2). pp. 776.
15. Tiippana-Usvasalo M., Pajunen N., Holuszko M. The role of education in promoting circular economy // *International journal of sustainable engineering*. 2023. № 16(1). pp. 92-103.

Implementation of the principles of closed-loop economics in training courses on the design of petrochemical plants

Arsen B. Miniyarov

Expert specialist

Ufa State Petroleum Technological University

Ufa, Russia

florisov@yandex.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Rinat A. Gindullin

Expert specialist

Ufa State Petroleum Technological University

Ufa, Russia

gindullin.rinat2013@yandex.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Darya O. Chebotareva

Expert specialist
Ufa State Petroleum Technological University
Ufa, Russia
chebotarewa.daria@gmail.com
ORCID 0000-0000-0000-0000

Alina S. Zavalikhina

Expert specialist
Ufa State Petroleum Technological University
Ufa, Russia
alinazavalikhina@yandex.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Victoria I. Budko

Expert specialist
Ufa State Petroleum Technological University
Ufa, Russia
uwu.budko.uwu@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 01.02.2025

Accepted 22.03.2025

Published 30.04.2025

UDC 66.101.4:338.350.73:37.016.3

DOI 10.25726/k8668-0066-6090-a

EDN UCLLVA

VAK 5.8.7. Methodology and technology of vocational education (pedagogical sciences)

OECD 05.03.HE. EDUCATION, SPECIAL

Abstract

The modern petrochemical industry is facing unprecedented challenges related to the depletion of natural resources, stricter environmental standards and the growing demand for sustainable development. The integration of the principles of closed-loop economics into educational programs for the design of petrochemical plants is an innovative approach to the formation of a new generation of specialists. This study is aimed at developing and evaluating a comprehensive methodology for the transformation of existing training courses through the prism of circular economy. The research methodology includes a systematic analysis of current educational practices at 42 leading technical universities, expert interviews with 87 representatives of the academic community and industry, as well as experimental implementation of modified training modules with subsequent evaluation of the results. The developed integrative model for the transformation of educational programs demonstrates an increase in the effectiveness of students' assimilation of the principles of sustainable design by 34,2% and an increase in the practical application of circular solutions in course projects by 41,7%. A significant result is the created taxonomy of competencies for a design engineer of a new type of petrochemical production, focused on closed production cycles. The research lays the theoretical and methodological foundation for a systematic review of engineering education in the petrochemical industry and offers practical tools for the implementation of the principles of circular economy in the educational process.

Keywords

Keywords: circular economy, petrochemical production, engineering education, sustainable design, transformation of educational programs, resource efficiency, competence approach.

References

1. de la Torre G.E., Rai P.K., Sanjeevi V., Putri A.R.C., Takele T.B. Fostering education for circular economy through life cycle thinking // *IntechOpen*. 2021. <https://www.intechopen.com/chapters/77203/>
2. Desha, C., & Hargroves, K. (2014). A peaking and tailing approach to education and curriculum renewal for sustainable development // *Sustainability*. 2014. № 6. pp. 4181-4199.
3. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N.M.P., Hultink E.J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? // *Journal of cleaner production*. 2017. № 143. pp. 757-768.
4. Giannoccaro I., Dey P.K., del Vecchio D. Stakeholder engagement in the circular economy: A systematic literature review // *Business strategy and the environment*. 2021. № 30(8). pp. 4023-4043.
5. Kirchherr J., Piscicelli L. Towards an Education for the Circular Economy (ECE): five teaching principles and a case study // *Resources, conservation & recycling*. 2019. № 150. pp. 104406.
6. Kowasch M. Circular economy, cradle to cradle and zero waste frameworks in teacher education for sustainability // *International journal of sustainability in higher education*. 2022. № 23(6). pp. 1404.
7. Lange J.-P. Towards circular carbo-chemicals – the metamorphosis of petrochemicals // *Energy & Environmental science*. 2021. № 14. pp. 4358-4376.
8. Liguori R., Faraco V. Biological processes for advancing lignocellulosic waste biorefinery by advocating circular economy // *Bioresource technology*. 2016. № 215. pp. 13-20.
9. Merli R., Preziosi M., Acampora A. How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review // *Journal of Cleaner Production*. 2018. № 178. pp. 703-722.
10. O'Born R., Heimdal A. Experiences from teaching circular economy concepts to engineering students // *Proceedings of the 24th Inter. conf. on engineering and product design education (E&PDE 2022)*. 2022.
11. Qi J., Zhao J., Li W., Peng X., Wu B., Wang H. The Circular economy-oriented practice in the petrochemical industry // *ResearchGate*. 2016. https://www.researchgate.net/publication/309030550_The_Circular_Economy-Oriented_Practice_in_the_Petrochemical_Industry/
12. Rodríguez-Chueca J., Molina-García A., García-Aranda C., Pérez J., Rodríguez E. Understanding sustainability and the circular economy through flipped classroom and challenge-based learning: an innovative experience in engineering education in Spain // *Environmental education research*. 2020. № 26(2).
13. Saeed S., Arshad M.Y., Ahmed A.S. Advancing circular economy in industrial chemistry and environmental engineering: principles, alignment with united nations sustainable development goals and pathways to implementation // *European journal of chemistry*. 2023. № 14. pp. 414-428.
14. Sumter D., de Koning J., Bakker C., Balkenende R. Key competencies for design in a circular economy: exploring gaps in design knowledge and skills for a circular economy // *Sustainability*. 2021. № 13(2). pp. 776.
15. Tiippana-Usvasalo M., Pajunen N., Holuszko M. The role of education in promoting circular economy // *International journal of sustainable engineering*. 2023. № 16(1). pp. 92-103.