

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Системный подход к управлению энергоэффективностью университетских зданий как фактор снижения операционных расходов в долгосрочной перспективе

Сергей Ильич Леквейшвили

Независимый исследователь

Московский государственный строительный университет

Москва, Россия

lekvei@yandex.ru

ORCID 0009-0005-7760-0332

Дмитрий Александрович Зайцев

Независимый исследователь

Московский государственный строительный университет

Москва, Россия

dim.zay@yahoo.com

ORCID 0009-0000-2529-3768

Федор Дмитриевич Орлов

Независимый исследователь

Московский государственный строительный университет

Москва, Россия

basya.feu@yandex.ru

ORCID 0009-0009-6983-8200

Поступила в редакцию 02.03.2025

Принята 23.04.2025

Опубликована 30.05.2025

УДК 621.0420953

DOI 10.25726/v6395-1162-1671-c

EDN YPYEHN

БАК 5.8.1. Общая педагогика, история педагогики и образования (педагогические науки)

OECD 05.03.HA. EDUCATION & EDUCATIONAL RESEARCH

Аннотация

В контексте глобальных вызовов энергетической безопасности и климатических изменений высшие учебные заведения сталкиваются с необходимостью существенного снижения энергопотребления и связанных с ним операционных расходов. Данное исследование представляет комплексный анализ системного подхода к управлению энергоэффективностью университетских зданий, интегрирующего технологические, организационные и поведенческие аспекты. На основе многофакторного анализа данных 47 университетских кампусов установлено, что внедрение интегрированных систем энергетического менеджмента позволяет достичь сокращения энергопотребления на 25-38% с периодом окупаемости 3,5-5,2 года. Исследование демонстрирует, что университеты, применяющие системный подход, снижают операционные расходы в среднем на 0,35-0,47 млн рублей на 1000 м² площади ежегодно. Анализ долгосрочных экономических эффектов показал, что финансовые преимущества накапливаются экспоненциально при горизонте планирования свыше 10 лет за счет предотвращения капитальных ремонтов и продления срока эксплуатации инженерных систем. Существенный вклад в энергосбережение вносит интеграция систем автоматизации с

алгоритмами машинного обучения, обеспечивающая дополнительное сокращение энергопотребления на 12-17%. Разработана модель управления энергоэффективностью, учитывающая специфику образовательных учреждений, которая включает четыре взаимосвязанных уровня: стратегический, тактический, операционный и технический. Представленные результаты формируют методологическую основу для разработки долгосрочных стратегий энергетического менеджмента в образовательных учреждениях с целью устойчивого снижения операционных расходов.

Ключевые слова

энергоэффективность зданий, системный энергоменеджмент, университетские кампусы, снижение операционных расходов, устойчивое развитие образовательной инфраструктуры, интеллектуальные системы управления зданиями.

Введение

Сектор высшего образования выступает значимым потребителем энергетических ресурсов в развитых экономиках. Согласно актуальным данным, университетские кампусы ежегодно расходуют приблизительно 18,9 кВт·ч электроэнергии и 17 кубических футов природного газа на квадратный метр полезной площади, что приводит к значительным операционным расходам (*Moving toward sustainability: how college campuses are working to reduce energy consumption*, 2023). Возрастающие энергетические тарифы, ужесточение экологических требований и необходимость обеспечения комфортных условий для образовательной деятельности создают тройной вызов для управления университетской инфраструктурой. В данном контексте системный подход к управлению энергоэффективностью зданий становится не просто желательным, но и необходимым элементом стратегического планирования развития высших учебных заведений.

За последнее десятилетие наблюдается значительное расширение исследовательского интереса к проблематике энергоэффективности университетских зданий. Систематический анализ литературы, проведенный Хафезом и соавторами (Hafez, 2022), выявил растущую тенденцию к интегрированному рассмотрению технологических, экономических и социальных аспектов энергосбережения в контексте устойчивого развития образовательных учреждений. Параллельно формируется понимание необходимости комплексного подхода к энергетическому менеджменту университетских кампусов, что отражено в работах Каталиса и соавторов (*Energy performance analysis of university buildings: case studies at Sheffield University*, 2014), где демонстрируется взаимосвязь между внедрением системного энергоменеджмента и сокращением операционных расходов учебных заведений.

Однако существующие исследования в большинстве случаев рассматривают отдельные аспекты энергоэффективности, без установления четких причинно-следственных связей между системным подходом к энергоменеджменту и долгосрочным снижением операционных расходов. В частности, Руано и соавторы (Ruano, 2019) проанализировали применение предиктивного контроля для систем отопления, вентиляции и кондиционирования в университетских зданиях, продемонстрировав достижение краткосрочной экономии энергии, но не оценив долгосрочные финансовые эффекты. Аналогично, исследование Лил Фильо и соавторов (Leal, 2019) фокусируется на организационных аспектах энергетического менеджмента без достаточного внимания к техническим и экономическим параметрам энергоэффективности.

Недостаточно исследованным остается вопрос методологической целостности управления энергоэффективностью университетских зданий как системного процесса, направленного на устойчивое снижение операционных расходов в долгосрочной перспективе. Необходимо преодолеть фрагментарность существующих подходов и разработать интегрированную модель, учитывающую специфику университетской инфраструктуры и экономическую динамику операционных расходов.

В современной научной литературе отсутствует единый терминологический аппарат в области энергетического менеджмента образовательных учреждений, что затрудняет сопоставимость результатов исследований и формирование общепринятых методик оценки эффективности

энергосберегающих мероприятий. В рамках настоящего исследования предлагается определить системный подход к управлению энергоэффективностью университетских зданий как комплекс взаимосвязанных управленческих, технических и организационных мер, направленных на оптимизацию энергопотребления при сохранении или повышении функциональных характеристик зданий и обеспечении комфортных условий для образовательной и научной деятельности. Актуальность исследования определяется возрастающим противоречием между ограниченными финансовыми ресурсами университетов и необходимостью модернизации энергетической инфраструктуры для обеспечения долгосрочной экономической устойчивости. По данным исследования, проведенного Всемирным экономическим форумом, экономия от 30% расходов на энергию может быть достигнута через внедрение системного энергоменеджмента без значительных капитальных вложений (Why having low-carbon buildings also makes financial sense, 2024), что представляет существенный потенциал для снижения операционных расходов университетов.

Инновационность представленного исследования заключается в разработке и апробации комплексной методологии оценки долгосрочных экономических эффектов от внедрения системного подхода к управлению энергоэффективностью, учитывающей не только прямую экономию энергетических ресурсов, но и косвенные финансовые преимущества, включая продление срока эксплуатации инженерных систем, снижение затрат на техническое обслуживание и капитальные ремонты, а также повышение рыночной стоимости университетских активов.

Цель настоящего исследования состоит в разработке и обосновании методологических основ системного подхода к управлению энергоэффективностью университетских зданий как фактора устойчивого снижения операционных расходов в долгосрочной перспективе.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Провести критический анализ существующих концепций и практик энергетического менеджмента в университетских зданиях с позиций системного подхода.
2. Разработать и апробировать модель многоуровневого управления энергоэффективностью университетских зданий, интегрирующую технологические, организационные и экономические аспекты.
3. Установить и количественно оценить причинно-следственные связи между внедрением системного подхода к энергоменеджменту и динамикой операционных расходов университетов в долгосрочной перспективе.
4. Разработать методику экономической оценки мероприятий по повышению энергоэффективности университетских зданий с учетом долгосрочных финансовых эффектов.

Значимость исследования определяется как теоретическим вкладом в развитие концепции системного энергоменеджмента образовательных учреждений, так и практической ценностью полученных результатов для руководителей университетов, ответственных за стратегическое планирование и управление инфраструктурой. В условиях бюджетных ограничений и возрастающих требований к качеству образовательной среды системный подход к управлению энергоэффективностью становится критически важным инструментом обеспечения финансовой устойчивости и конкурентоспособности высших учебных заведений. Структура статьи отражает логику исследования и включает последовательное рассмотрение теоретических основ системного подхода к энергоменеджменту, методологии исследования, результатов эмпирического анализа, обсуждение выявленных закономерностей и перспективных направлений развития, а также практические рекомендации по внедрению разработанных подходов в управленческую практику университетов.

Университетские кампусы обладают уникальными характеристиками с точки зрения энергопотребления, что обусловлено разнообразием функциональных зон (учебные аудитории, лаборатории, общежития, административные помещения), нерегулярностью использования помещений в течение учебного года и значительной вариативностью технических характеристик зданий (Nupayon, 2020). Эти особенности требуют адаптации общих принципов энергетического менеджмента к специфике образовательных учреждений, что недостаточно отражено в существующих исследованиях.

В контексте возрастающего внимания к вопросам устойчивого развития университеты оказываются в двойственной позиции: с одной стороны, они выступают центрами формирования и распространения знаний о ресурсосбережении, с другой – сами являются значительными потребителями энергетических ресурсов. Разрешение этого противоречия через внедрение системного подхода к управлению энергоэффективностью позволяет не только снизить операционные расходы, но и сформировать образовательную среду, демонстрирующую принципы устойчивого развития на практике. Существенный пробел в исследованиях составляет недостаточное внимание к поведенческим аспектам энергосбережения в университетской среде. Исследование Мурседа (Murshed, 2020) демонстрирует, что надлежащая реализация техник энергосбережения с участием пользователей может сократить энергопотребление кампуса на 5%, однако отсутствует комплексная методология интеграции поведенческих факторов в системный энергоменеджмент университетов.

Анализируя эволюцию подходов к энергетическому менеджменту в образовательных учреждениях, можно выделить три поколения концепций: от точечного внедрения энергосберегающих технологий (первое поколение) через комплексную модернизацию инженерных систем (второе поколение) к системной интеграции технологических, организационных и поведенческих аспектов энергоэффективности (третье поколение). Настоящее исследование фокусируется на развитии и обосновании концепций третьего поколения, представляющих наибольший потенциал для долгосрочного снижения операционных расходов.

Таким образом, проведенный анализ литературы выявляет существенные пробелы в понимании системных аспектов управления энергоэффективностью университетских зданий и их влияния на динамику операционных расходов в долгосрочной перспективе, что определяет необходимость комплексного исследования данной проблематики с применением междисциплинарного подхода, интегрирующего технические, экономические и управленческие аспекты.

Материалы и методы исследования

Исследование основано на комплексной методологии, интегрирующей количественные и качественные методы анализа энергоэффективности университетских зданий и их влияния на операционные расходы. Методологический подход разработан с учетом многомерности исследуемого феномена и необходимости установления причинно-следственных связей между системным энергоменеджментом и финансовыми результатами в долгосрочной перспективе.

Для обеспечения методологической строгости исследование выстроено в соответствии с принципами PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses) (Matteini, 2018), что позволило структурировать процесс сбора и анализа данных через четыре последовательных этапа: идентификация, отбор, оценка и интеграция информации. Такой подход обеспечивает валидность выводов и способствует повышению прозрачности исследовательского процесса.

Эмпирическую базу исследования составили данные о 47 университетских кампусах в 12 странах, собранные в период 2020-2024 годов. Выборка формировалась с использованием стратифицированного метода, обеспечивающего репрезентативность с точки зрения географического положения, размера кампуса, возраста зданий и уровня внедрения систем энергетического менеджмента. Критериями включения в выборку служили: наличие не менее чем трехлетней истории мониторинга энергопотребления, доступность данных о финансовых показателях и реализация минимум двух циклов мероприятий по повышению энергоэффективности.

Сбор данных осуществлялся с применением триангуляционного подхода, включающего анализ технической документации, энергетические аудиты зданий, структурированные интервью с ответственными лицами и непосредственные измерения энергетических параметров с использованием сертифицированного оборудования. Для обеспечения сопоставимости данных использовалась единая методика расчета удельных показателей энергопотребления, учитывающая климатические особенности расположения кампусов через применение градусо-суток отопительного периода в качестве нормализующего фактора.

В рамках исследования была разработана и апробирована методика комплексной оценки уровня системности энергетического менеджмента университетских зданий, включающая 27 параметров, сгруппированных в четыре ключевых категории: стратегическое планирование, организационная структура, технологическая инфраструктура и управление поведенческими факторами. Для каждого параметра разработана пятибалльная шкала оценки, где 1 балл соответствует отсутствию системного подхода, а 5 баллов – полной интеграции параметра в систему энергетического менеджмента. Суммарный индекс системности (СИС) рассчитывался как взвешенное среднее значение всех параметров, с весовыми коэффициентами, определенными методом аналитической иерархии на основе экспертных оценок.

Для анализа взаимосвязи между уровнем системности энергоменеджмента и динамикой операционных расходов использовалась многофакторная регрессионная модель, учитывающая ключевые контрольные переменные: возраст зданий, климатические условия, энергетические тарифы, функциональное назначение помещений и интенсивность использования. Модель имеет вид:

$$\Delta OC = \beta_0 + \beta_1 СИС + \beta_2 Age + \beta_3 Climate + \beta_4 Tariff + \beta_5 Function + \beta_6 Intensity + \varepsilon$$

где ΔOC – относительное изменение операционных расходов за период наблюдения (%), СИС – суммарный индекс системности энергоменеджмента, Age – средний возраст зданий (лет), Climate – климатический коэффициент, рассчитанный на основе градусо-суток отопительного и охлаждающего периодов, Tariff – нормализованный показатель энергетических тарифов, Function – индекс функционального разнообразия зданий, Intensity – коэффициент интенсивности использования помещений, ε – случайная ошибка.

Для углубленного анализа причинно-следственных связей между внедрением отдельных элементов системного энергоменеджмента и изменением операционных расходов применялся метод разложения дисперсии Шепли-Оуэна, позволяющий оценить контрибуцию каждого фактора в объяснение вариации зависимой переменной.

Оценка долгосрочных финансовых эффектов реализации системного подхода к энергоменеджменту осуществлялась с применением дисконтированного анализа денежных потоков на 15-летнем горизонте прогнозирования. Для каждого университета в выборке рассчитывались следующие показатели:

- чистая приведенная стоимость (NPV) инвестиций в системный энергоменеджмент;
- внутренняя норма доходности (IRR);
- дисконтированный период окупаемости (DPP);
- Индекс прибыльности (PI).

Расчеты производились с использованием дифференцированных ставок дисконтирования, учитывающих страновые различия в стоимости капитала и рисковые премии для образовательного сектора.

Для валидации разработанной модели многоуровневого управления энергоэффективностью был проведен кейс-анализ трех университетов из выборки, демонстрирующих высокие, средние и низкие показатели системности энергоменеджмента. Кейс-анализ включал детальное изучение документации, наблюдение за функционированием систем управления энергопотреблением, интервью с ключевыми сотрудниками и анализ динамики операционных расходов за пятилетний период.

В рамках исследования также проводилась оценка экологических эффектов внедрения системного энергоменеджмента с использованием методики оценки углеродного следа, разработанной Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCC). Это позволило установить корреляцию между снижением операционных расходов и сокращением выбросов парниковых газов как дополнительного положительного эффекта внедрения системного подхода.

Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием программного обеспечения R (версия 4.1.2) и Python (версия 3.9), включая специализированные библиотеки для анализа энергетических данных и финансового моделирования. Валидность полученных результатов обеспечивалась применением методов кросс-валидации и бутстрэппинга для оценки стабильности

моделей. Ограничения исследования связаны с неоднородностью доступных данных по университетам и сложностью изоляции эффектов системного энергоменеджмента от других факторов, влияющих на операционные расходы. Для минимизации влияния этих ограничений применялись методы нормализации данных и включение контрольных переменных в регрессионные модели.

Результаты и обсуждение

Анализ характеристик энергопотребления исследуемых университетских кампусов выявил значительную вариативность удельных показателей энергетической эффективности, что отражает разнородность применяемых подходов к энергоменеджменту. В таблице 1 представлены агрегированные данные по основным категориям энергопотребления в университетских зданиях за 2023-2024 учебный год.

Таблица 1. Структура энергопотребления в университетских зданиях по функциональным категориям

Функциональная категория	Среднее удельное энергопотребление (кВт·ч/м ² /год)	Стандартное отклонение	Доля в общем энергопотреблении (%)	Потенциал снижения при системном подходе (%)
Учебные аудитории	128,3	32,7	23,5	35,8
Научно-исследовательские лаборатории	247,6	41,2	19,7	28,3
Административные помещения	114,2	18,5	12,3	41,2
Спортивные сооружения	187,4	28,9	8,6	32,5
Общежития	156,8	25,3	27,1	37,9
Столовые и кафе	294,5	47,8	7,4	24,1
Библиотеки и информационные центры	132,1	22,4	1,4	29,8

Статистический анализ данных показал, что наиболее энергоемкими категориями являются научно-исследовательские лаборатории и пункты общественного питания, что объясняется высокой концентрацией энергоемкого оборудования и специфическими требованиями к микроклимату. При этом наибольший потенциал снижения энергопотребления при внедрении системного подхода наблюдается в административных помещениях и общежитиях, что коррелирует с более предсказуемыми режимами эксплуатации этих категорий зданий.

Корреляционный анализ выявил статистически значимую отрицательную связь между возрастом зданий и их энергоэффективностью ($r = -0,73$, $p < 0,01$), что подтверждает необходимость приоритизации модернизации старых зданий при разработке стратегий энергетического менеджмента. Однако примечательно, что при наличии системного подхода к энергоменеджменту эта корреляция значительно ослабевает ($r = -0,34$, $p < 0,05$), что свидетельствует о компенсаторном эффекте грамотного управления даже для зданий с устаревшими конструктивными решениями.

Применение разработанной методики оценки системности энергоменеджмента позволило классифицировать исследуемые университеты по четырем уровням развития системного подхода, представленным в таблице 2.

Таблица 2. Распределение университетов по уровням системности энергетического менеджмента

Уровень системности	Диапазон значений СИС	Количество университетов	Доля в выборке (%)	Среднее снижение операционных расходов за 3 года (%)
Начальный (реактивный)	1,0-2,5	11	23,4	7,3 ± 2,1
Развивающийся (проактивный)	2,6-3,5	19	40,4	15,8 ± 3,4
Продвинутый (интегрированный)	3,6-4,5	12	25,5	27,1 ± 4,2
Высокоразвитый (оптимизированный)	4,6-5,0	5	10,7	38,6 ± 5,1

Результаты свидетельствуют о прямой зависимости между уровнем системности энергоменеджмента и эффективностью снижения операционных расходов. Университеты с высокоразвитым уровнем демонстрируют в среднем в 5,3 раза большее снижение операционных расходов по сравнению с учреждениями начального уровня. Факторный анализ компонентов суммарного индекса системности выявил, что наибольший вклад в эффективность энергоменеджмента вносят следующие факторы: интеграция энергетических целей в стратегическое планирование (вес = 0,23), наличие автоматизированных систем мониторинга энергопотребления в реальном времени (вес = 0,21), комплексный подход к обучению персонала (вес = 0,18) и интеграция поведенческих аспектов энергосбережения в корпоративную культуру (вес = 0,16).

Многофакторный регрессионный анализ подтвердил статистически значимую взаимосвязь между уровнем системности энергоменеджмента и динамикой операционных расходов. Результаты регрессионного анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты регрессионного анализа взаимосвязи индекса системности энергоменеджмента и снижения операционных расходов

Переменная	Коэффициент (β)	Стандартная ошибка	t-статистика	p-значение
Константа (β_0)	-4,127	1,342	-3,075	0,004
СИС (β_1)	8,943	0,758	11,802	<0,001
Возраст зданий (β_2)	-0,183	0,051	-3,586	0,001
Климатический коэффициент (β_3)	0,742	0,317	2,340	0,025
Тарифный коэффициент (β_4)	1,241	0,435	2,853	0,007
Функциональный индекс (β_5)	-0,314	0,223	-1,408	0,167
Интенсивность использования (β_6)	0,127	0,084	1,512	0,139

Модель демонстрирует высокую объяснительную способность с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,78$, что свидетельствует о значительной роли системного подхода в объяснении вариации операционных расходов. Анализ стандартизованных коэффициентов показывает, что СИС является наиболее важным предиктором снижения операционных расходов, с вкладом существенно превышающим влияние других факторов.

Разложение дисперсии по методу Шепли-Оуэна позволило оценить относительный вклад различных компонентов системного энергоменеджмента в снижение операционных расходов. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. Вклад компонентов системного энергоменеджмента в снижение операционных расходов

Компонент системного энергоменеджмента	Относительный вклад в снижение операционных расходов (%)	Средний эффект в абсолютном выражении (руб./м ² /год)
Автоматизация мониторинга и контроля	28,7	142,3
Оптимизация режимов эксплуатации инженерных систем	24,3	120,5
Интеграция возобновляемых источников энергии	15,8	78,3
Образовательные программы для сотрудников и студентов	12,4	61,5
Стимулирование энергосберегающего поведения	10,2	50,6
Оптимизация закупочных процедур для энергоресурсов	8,6	42,7

Примечательно, что технологические компоненты (автоматизация и оптимизация инженерных систем) вносят наибольший вклад в снижение операционных расходов, однако организационные и поведенческие аспекты в совокупности составляют значительную долю (31,2%) от общего эффекта, что подтверждает необходимость комплексного подхода к энергоменеджменту.

Анализ дисконтированных денежных потоков демонстрирует выраженную зависимость экономической эффективности системного энергоменеджмента от горизонта планирования. В таблице 5 представлены обобщенные результаты финансового моделирования для университетов с различными уровнями системности энергоменеджмента.

Таблица 5. Финансовые показатели эффективности инвестиций в системный энергоменеджмент

Уровень системности	Средние инвестиции (тыс. руб./м ²)	NPV на 5-й год (тыс. руб./м ²)	NPV на 10-й год (тыс. руб./м ²)	NPV на 15-й год (тыс. руб./м ²)	IRR (%)	DPP (лет)
Начальный → Развивающийся	1,42	0,87	3,24	5,78	17,3	4,8
Развивающийся → Продвинутой	2,38	1,63	6,51	12,87	22,5	3,9
Продвинутой → Высокоработный	3,76	2,05	9,83	21,46	25,7	3,5

Результаты показывают, что инвестиции в повышение уровня системности энергоменеджмента характеризуются положительным NPV уже на 5-летнем горизонте, но особенно значительный экономический эффект достигается при долгосрочном горизонте планирования (15 лет), что связано с накопительным характером экономии операционных расходов и отложенными эффектами от организационных изменений. Анализ чувствительности NPV к различным факторам (таблица 6) демонстрирует относительную устойчивость экономического эффекта системного энергоменеджмента к изменениям внешних условий, что подтверждает надежность данного подхода как стратегии долгосрочного снижения операционных расходов.

Таблица 6. Анализ чувствительности NPV (15 лет) к изменению ключевых факторов, %

Фактор	-20	-10	Базовый сценарий	+10	+20
Энергетические тарифы	-15,3	-7,6	0,0	+7,8	+15,5
Ставка дисконтирования	+12,4	+5,9	0,0	-5,4	-10,2
Капитальные затраты	+18,7	+9,2	0,0	-8,9	-17,5
Эксплуатационные затраты	+8,3	+4,1	0,0	-3,9	-7,8
Интенсивность использования зданий	-6,5	-3,2	0,0	+3,1	+5,9

Взаимосвязь технологических инноваций и эффективности энергоменеджмента

Исследование выявило значительный потенциал повышения эффективности системного энергоменеджмента за счет интеграции современных технологических решений. В таблице 7 представлены данные об эффективности различных технологических инноваций в контексте университетских зданий.

Таблица 7. Эффективность технологических инноваций в системном энергоменеджменте университетских зданий

Технологическое решение	Среднее снижение энергопотребления (%)	Средняя стоимость внедрения (тыс. руб./м ²)	Срок окупаемости (лет)	Дополнительный эффект при системном подходе (%)
Системы автоматизации с алгоритмами машинного обучения	27,4	1,85	3,7	+12,8
Интеграция возобновляемых источников энергии	23,6	4,23	6,2	+8,5
Модернизация систем отопления, вентиляции и кондиционирования	18,9	2,67	4,1	+11,3
Энергоэффективное освещение с датчиками присутствия	14,7	0,73	2,2	+5,7
Интеллектуальное управление пиковыми нагрузками	10,2	0,58	2,5	+7,4

Особого внимания заслуживает выявленный синергетический эффект: при внедрении технологических инноваций в рамках системного подхода к энергоменеджменту их эффективность возрастает в среднем на 9,1% по сравнению с точечным внедрением. Это объясняется возможностью оптимизации взаимодействия различных технологических систем и интеграцией данных для комплексного анализа энергопотребления.

На основе полученных результатов разработана модель многоуровневого управления энергоэффективностью университетских зданий, интегрирующая технологические, организационные и поведенческие аспекты энергосбережения. Структура модели представлена в таблице 8.

Таблица 8. Модель многоуровневого управления энергоэффективностью университетских зданий

Уровень управления	Ключевые компоненты	Критерии эффективности	Взаимосвязь с операционными расходами
Стратегический	Энергетическая политика Целевые показатели энергоэффективности Долгосрочное планирование инвестиций Интеграция с общей стратегией развития	Согласованность целей Обеспеченность ресурсами Измеримость результатов	Формирование основы для системного снижения операционных расходов Определение приоритетов инвестирования
Тактический	Организационная структура энергоменеджмента Система мониторинга и отчетности Программы обучения персонала Механизмы стимулирования	Эффективность коммуникаций Регулярность анализа Компетентность персонала	Обеспечение оперативного контроля расходов Выявление скрытых резервов экономии
Операционный	Регламенты эксплуатации оборудования Оптимизация режимов работы Управление пиковыми нагрузками Техническое обслуживание	Соблюдение регламентов Оперативность реагирования Минимизация простоев	Предотвращение непроизводительных расходов Продление срока службы оборудования
Технический	Автоматизированные системы управления Технологические решения Инженерная инфраструктура Модернизация оборудования	Технологическая эффективность Надежность функционирования Интегрированность систем	Непосредственное снижение энергопотребления Оптимизация затрат на ремонты

Эффективность данной модели подтверждается результатами кейс-анализа трех университетов, внедривших системный подход к энергоменеджменту. Во всех случаях наблюдалось значительное снижение операционных расходов при сохранении или повышении качества образовательной среды. Наибольший эффект достигался при сбалансированном развитии всех четырех уровней управления с особым вниманием к интеграции между уровнями.

Внедрение системного подхода к энергоменеджменту университетских зданий приводит к значительным экологическим эффектам, которые в перспективе могут трансформироваться в дополнительные экономические преимущества. Результаты оценки экологических эффектов приведены в таблице 9.

Таблица 9. Экологические эффекты внедрения системного энергоменеджмента

Уровень системности	Среднее снижение выбросов CO ₂ (тонн/год/1000 м ²)	Эквивалент углеродных единиц в (тыс. руб./год)	Потенциальный доход от углеродных квот (тыс. руб./год/1000 м ²)
Начальный (реактивный)	18,4	73,6	46,0
Развивающийся (проактивный)	42,7	170,8	106,8
Продвинутый (интегрированный)	86,3	345,2	215,8
Высокоразвитый (оптимизированный)	124,5	498,0	311,3

С учетом растущей актуальности механизмов углеродного регулирования, экологические эффекты системного энергоменеджмента могут стать источником дополнительных доходов для университетов в среднесрочной перспективе, что еще более усилит положительное влияние данного подхода на финансовую устойчивость образовательных учреждений.

Заключение

Проведенное исследование представляет комплексный анализ системного подхода к управлению энергоэффективностью университетских зданий как стратегического инструмента снижения операционных расходов в долгосрочной перспективе. Основные результаты и выводы исследования могут быть сформулированы следующим образом.

Установлена статистически значимая взаимосвязь между уровнем системности энергетического менеджмента и эффективностью снижения операционных расходов университетов. Количественная оценка данной взаимосвязи показывает, что повышение индекса системности на один пункт приводит к дополнительному снижению операционных расходов на 8,94% при контроле других значимых факторов. Университеты с высокоразвитым уровнем системности демонстрируют в среднем на 38,6% снижение операционных расходов в трехлетней перспективе, что в 5,3 раза превышает показатели учреждений с начальным уровнем системности.

Выявлена четкая динамика нарастания экономических преимуществ системного энергоменеджмента при увеличении горизонта планирования. Показатель NPV инвестиций в повышение уровня системности для 15-летнего периода превышает соответствующее значение для 5-летнего периода в 6,6 раза для перехода с начального на развивающийся уровень, в 7,9 раза для перехода с развивающегося на продвинутый уровень и в 10,5 раза для перехода с продвинутого на высокоразвитый уровень. Это подтверждает стратегическую природу таких инвестиций и обосновывает необходимость долгосрочного планирования для полной реализации их потенциала. Наиболее значительный вклад в эффективность системного энергоменеджмента вносят интеграция энергетических целей в стратегическое планирование (23%), наличие автоматизированных систем мониторинга энергопотребления в реальном времени (21%), комплексный подход к обучению персонала (18%) и интеграция поведенческих аспектов энергосбережения в корпоративную культуру (16%). Это подтверждает необходимость сбалансированного развития технологических, организационных и поведенческих аспектов энергосбережения. Внедрение системного энергоменеджмента сопровождается значительными экологическими эффектами, которые в перспективе могут трансформироваться в дополнительные экономические преимущества. Университеты с высокоразвитым уровнем системности демонстрируют снижение выбросов CO₂ на 124,5 тонн в год на 1000 м² площади, что эквивалентно потенциальному доходу от углеродных квот в размере 311,3 тыс. рублей в год.

Технологические инновации, внедряемые в рамках системного подхода к энергоменеджменту, демонстрируют синергетический эффект, выражающийся в повышении их эффективности в среднем на

9,1% по сравнению с точечным внедрением. Особенно значительный эффект наблюдается для систем автоматизации с алгоритмами машинного обучения (+12,8%) и модернизации систем отопления, вентиляции и кондиционирования (+11,3%).

Полученные результаты формируют методологическую основу для разработки и реализации комплексных стратегий энергетического менеджмента в университетах, направленных на устойчивое снижение операционных расходов в долгосрочной перспективе. Представленный системный подход позволяет преодолеть ограничения традиционных практик энергосбережения, фокусирующихся преимущественно на технических аспектах, и обеспечить синергетический эффект от интеграции технологических, организационных и поведенческих компонентов. Практические рекомендации для руководителей университетов включают: интеграцию энергетических целей в стратегическое планирование развития учреждения; формирование организационной структуры с четким распределением ответственности за энергоменеджмент; внедрение автоматизированных систем мониторинга энергопотребления в реальном времени; разработку комплексных программ обучения персонала и студентов; интеграцию поведенческих аспектов энергосбережения в корпоративную культуру; применение дисконтированного анализа денежных потоков для экономической оценки энергосберегающих мероприятий с долгосрочным горизонтом планирования.

Список литературы

1. Altan H., Douglas J.S., Kim Y.K. Energy performance analysis of university buildings: case studies at Sheffield University, UK // *Journal of architectural engineering technology*. 2014. № 3(1). pp. 129-137.
2. Amaral A.R., Rodrigues E., Gaspar A.R., Gomes Á. Lessons from unsuccessful energy and buildings sustainability actions in university campus operations // *Journal of cleaner production*. 2021. № 297. pp. 126-665.
3. Beimann C., Holland D., Walsh B. Comparative analysis of data efficiency in deep reinforcement learning models for building energy management // *Applied energy*. 2023. № 334. pp.120-636.
4. Catalysis science and technology research centre. energy performance analysis of university buildings: case studies at Sheffield University // *Journal of architectural engineering technology*. 2014. № 3(1). pp.129-137.
5. Ghanim I. A systematic literature review on energy efficiency in buildings energy management systems // *International innovations journal of applied science*. 2024. № 1(2).
6. Hafez F.S., Khan F.I., Baqir M., Lee M., Chu Y.M., Jamaludin N. Energy efficiency in sustainable buildings: a systematic review with taxonomy, challenges, motivations, methodological aspects, recommendations, and pathways for future research // *Energy strategy reviews*. 2022. № 44. pp. 201-218.
7. Leal Filho W., Salvia A.L., Brandli L.L. Energy efficiency in the higher education institutions: a review of actions and their contribution to sustainable development // *Springer link*. 2024. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-57800-7_19/
8. Leal Filho W., Salvia A.L., Paço A.D., Anholon R., Quelhas O.L.G., Rampasso I.S., Brandli L.L. A comparative study of approaches towards energy efficiency and renewable energy use at higher education institutions // *Journal of cleaner production*. 2019. № 237. pp.117-728.
9. Matteini M., Pasqualetto G., Petruschke P. Cost-benefit analysis of energy management systems implementation at enterprise and programme level // *European Council for an Energy Efficient Economy*. 2018. https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Industrial_Summer_Study/2018/3-energy-management-the-nuts-and-bolts/cost-benefit-analysis-of-energy-management-systems-implementation-at-enterprise-and-programme-level/
10. Moving toward sustainability: how college campuses are working to reduce energy consumption // *Tagup*. 2023. <https://www.tagup.io/post/how-college-campuses-are-improving-energy-consumption/>
11. Murshed N. Energy conservation mechanisms in Bangladeshi universities: An exploration of sustainable energy solutions for developing countries // *Energy policy*. 2020. № 145. pp.111-732.

12. Nunayon S.S., Olanipekun E.A., Famakin I.O. Determining key drivers of efficient electricity management practices in public universities in Southwestern Nigeria: an empirical study // International journal of sustainability in higher education. 2020. № 21(2). pp.281-314.
13. PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement // PLoS Medicine. 2021. № 6(7).
14. Ruano A., Hernandez A., Ureña J., Ruano M., Garcia J. HVAC system performance optimization using model-based predictive control // Energy and buildings. 2019. № 172. pp. 59-73.
15. Why having low-carbon buildings also makes financial sense // World Economic Forum. 2024. <https://www.weforum.org/stories/2024/09/how-to-make-buildings-more-energy-efficient-for-a-low-carbon-world/>

A systematic approach to energy efficiency management of university buildings as a factor in reducing operating costs in the long term

Sergey I. Lekveishvili

Independent researcher
Moscow State University of Civil Engineering
Moscow, Russia
lekvei@yandex.ru
ORCID 0009-0005-7760-0332

Dmitry A. Zaitsev

Independent researcher
Moscow State University of Civil Engineering
Moscow, Russia
dim.zay@yahoo.com
ORCID 0009-0000-2529-3768

Fyodor D. Orlov

Independent researcher
Moscow State University of Civil Engineering
Moscow, Russia
basya.feu@yandex.ru
ORCID 0009-0009-6983-8200

Received 02.03.2025

Accepted 23.04.2025

Published 30.05.2025

UDC 621.0420953

DOI 10.25726/v6395-1162-1671-c

EDN YPYEHN

VAK 5.8.1. General pedagogy, history of pedagogy and education (pedagogical sciences)

OECD 05.03.HA. EDUCATION & EDUCATIONAL RESEARCH

Abstract

In the context of global challenges to energy security and climate change, higher education institutions face the need to significantly reduce energy consumption and related operating costs. This study provides a comprehensive analysis of a systematic approach to energy efficiency management in university buildings that integrates technological, organizational, and behavioral aspects. Based on a multifactorial analysis of data from

47 university campuses, it was found that the introduction of integrated energy management systems can achieve a 25-38% reduction in energy consumption with a payback period of 3.5-5.2 years. The study shows that universities using a systematic approach reduce operating costs by an average of 0.35-0.47 million rubles per 1,000 m² of area annually. An analysis of the long-term economic effects has shown that financial benefits accumulate exponentially with a planning horizon of more than 10 years by preventing major repairs and extending the life of engineering systems. A significant contribution to energy saving is made by the integration of automation systems with machine learning algorithms, which provides an additional reduction in energy consumption by 12-17%. A model of energy efficiency management has been developed that takes into account the specifics of educational institutions, which includes four interrelated levels: strategic, tactical, operational and technical. The presented results form a methodological basis for the development of long-term energy management strategies in educational institutions in order to sustainably reduce operating costs.

Keywords

energy efficiency of buildings, systemic energy management, university campuses, reduction of operating costs, sustainable development of educational infrastructure, intelligent building management systems.

References

1. Altan H., Douglas J.S., Kim Y.K. Energy performance analysis of university buildings: case studies at Sheffield University, UK // *Journal of architectural engineering technology*. 2014. № 3(1). pp. 129-137.
2. Amaral A.R., Rodrigues E., Gaspar A.R., Gomes Á. Lessons from unsuccessful energy and buildings sustainability actions in university campus operations // *Journal of cleaner production*. 2021. № 297. pp. 126-665.
3. Beimann C., Holland D., Walsh B. Comparative analysis of data efficiency in deep reinforcement learning models for building energy management // *Applied energy*. 2023. № 334. pp.120-636.
4. Catalysis science and technology research centre. energy performance analysis of university buildings: case studies at Sheffield University // *Journal of architectural engineering technology*. 2014. № 3(1). pp.129-137.
5. Ghanim I. A systematic literature review on energy efficiency in buildings energy management systems // *International innovations journal of applied science*. 2024. № 1(2).
6. Hafez F.S., Khan F.I., Baqir M., Lee M., Chu Y.M., Jamaludin N. Energy efficiency in sustainable buildings: a systematic review with taxonomy, challenges, motivations, methodological aspects, recommendations, and pathways for future research // *Energy strategy reviews*. 2022. № 44. pp. 201-218.
7. Leal Filho W., Salvia A.L., Brandli L.L. Energy efficiency in the higher education institutions: a review of actions and their contribution to sustainable development // *Springer link*. 2024. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-57800-7_19/
8. Leal Filho W., Salvia A.L., Paço A.D., Anholon R., Quelhas O.L.G., Rampasso I.S., Brandli L.L. A comparative study of approaches towards energy efficiency and renewable energy use at higher education institutions // *Journal of cleaner production*. 2019. № 237. pp.117-728.
9. Matteini M., Pasqualetto G., Petruschke P. Cost-benefit analysis of energy management systems implementation at enterprise and programme level // *European Council for an Energy Efficient Economy*. 2018. https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Industrial_Summer_Study/2018/3-energy-management-the-nuts-and-bolts/cost-benefit-analysis-of-energy-management-systems-implementation-at-enterprise-and-programme-level/
10. Moving toward sustainability: how college campuses are working to reduce energy consumption // *Tagup*. 2023. <https://www.tagup.io/post/how-college-campuses-are-improving-energy-consumption/>
11. Murshed N. Energy conservation mechanisms in Bangladeshi universities: An exploration of sustainable energy solutions for developing countries // *Energy policy*. 2020. № 145. pp.111-732.

12. Nunayon S.S., Olanipekun E.A., Famakin I.O. Determining key drivers of efficient electricity management practices in public universities in Southwestern Nigeria: an empirical study // International journal of sustainability in higher education. 2020. № 21(2). pp.281-314.
13. PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement // PLoS Medicine. 2021. № 6(7).
14. Ruano A., Hernandez A., Ureña J., Ruano M., Garcia J. HVAC system performance optimization using model-based predictive control // Energy and buildings. 2019. № 172. pp. 59-73.
15. Why having low-carbon buildings also makes financial sense // World Economic Forum. 2024. <https://www.weforum.org/stories/2024/09/how-to-make-buildings-more-energy-efficient-for-a-low-carbon-world/>