



Экономическая эффективность электростанций на возобновляемых источниках энергии на примере показателя LCOE

Рецензия эксперта на статью получена 17.10.2024 [The expert review of the article was received on October 17, 2024]

Тенденция развития энергогенерации на основе возобновляемых источников энергии объясняется желанием многих стран стать независимыми от импорта углеводородного сырья, однако Российская Федерация, несмотря на достаточное количество запасов нефти и природного газа, также стремится к развитию возобновляемой энергетики.

В «Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» [1] в качестве приоритетов государственной энергетической политики указаны положения, согласно которым в России должно осуществляться стимулирование и поддержка инновационной деятельности организаций топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и смежных отраслей промышленности в направлении повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов и производственного потенциала ТЭК; минимизация негативного влияния добычи, производства, транспортировки и потребления энергоресурсов на окружающую среду, климат и здоровье людей.

Помимо этого, в «Энергетической стратегии...» [1] указано, что задачами развития возобновляемых источников энергии являются:

1. Ввод в эксплуатацию новых генерирующих мощностей, функционирующих на основе ВИЭ, при условии их экономической эффективности.

2. Развитие отечественной научно-технической базы и освоение передовых технологий в области использования возобновляемых источников энергии, наращивание производства на территории Российской Федерации основного генерирующего и вспомогательного оборудования для ВИЭ [1].

Развитие энергогенерации на основе ВИЭ обусловлено также следствием политики энергосбережения, которая направлена на сдерживание роста эмиссии парниковых газов и сокращение вредных выбросов энергетического комплекса в окружающую среду. Однако, несмотря на энергоэффективность и экологичность проектов возобновляемой энергетики, развитие генерации на основе возобновляемых источников энергии в условиях оптового рынка электрической энергии и мощности предъявляет требования к экономической эффективности новых проектов, которые должны быть конкурентоспособными по сравнению с электростанциями, основанными на традиционных способах генерации.

УДК 620.92. Научная специальность: 2.4.5.

Экономическая эффективность электростанций на возобновляемых источниках энергии на примере показателя LCOE

В. А. Зубакин, д.э.н., заведующий кафедрой (базовой) возобновляемых источников энергии (ВИЭ); **П. А. Жуков**, магистрант второго курса кафедры (базовой) ВИЭ, Российский государственный университет (РГУ) нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (г. Москва)

В данной статье был произведён расчёт показателя LCOE для электростанций разного типа, рассмотрены возможные альтернативные методики расчёта данного показателя, проведён сравнительный анализ результатов. Согласно «Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года», одним из приоритетных направлений развития в стране является строительство новых генерирующих мощностей, функционирующих на основе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, при условии их экономической эффективности. Одним из критериев экономической эффективности электростанций разного типа является показатель LCOE.

Ключевые слова: Энергетическая стратегия РФ, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), ветровая электростанция (ВЭС), солнечная электростанция СЭС, Levelized Cost of Electricity (LCOE).

UDC 620.92. The number of scientific specialty: 2.4.5.

The economic efficiency of renewable energy power plants using the example of the LCOE indicator

V. A. Zubakin, Doctor of Economics, Head of the Department (Basic) of Renewable Energy Sources (RES); **P. A. Zhukov**, second-year undergraduate student of the Department (basic) of RES, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow city)

In this article, the LCOE indicator was calculated for power plants of different types, possible alternative methods for calculating this indicator were considered, and a comparative analysis of the results was carried out. According to the "Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035", one of the priority areas of development in the country is the construction of new generating capacities operating on the basis of non-traditional and renewable energy sources, subject to their economic efficiency. One of the criteria for the economic efficiency of power plants of various types is the LCOE indicator.

Keywords: Energy Strategy of the Russian Federation, renewable energy sources (RES), wind power plant (WPP), solar power plant (SPP), Levelized Cost of Electricity (LCOE).

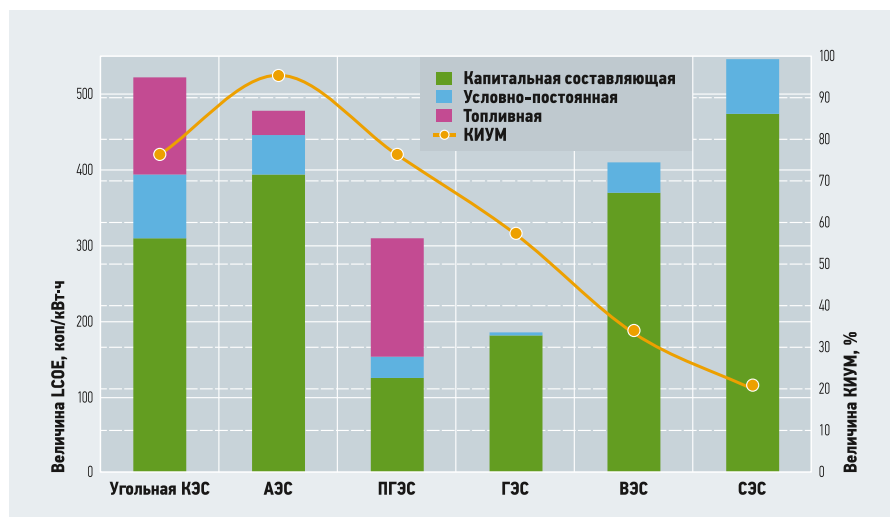


Рис. 1. Величина LCOE при WACC = 12 %

Наиболее популярным показателем экономической эффективности работы электростанций разного типа является методика для расчёта нормированной (средней) расчётной себестоимости производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла генерирующего объекта, получившая обозначение Levelized Cost of Electricity (LCOE):

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}, \quad (1)$$

где I_t — инвестиционные затраты в год t ; M_t — операционные затраты и затраты на содержание в год t ; F_t — затраты на топливо в год t ; E_t — производство электроэнергии в год t ; r — ставка дисконтирования; t — жизненный цикл системы [8].

LCOE отражает стоимость вырабатываемого мегаватт-часа электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла энергоустановки, учитывая плановый коэффициент извлечения установленной мощности (КИУМ), капитальные расходы на строительство, операционные расходы, топливо, проценты по привлекаемым кредитам, ремонт и вывод из эксплуатации. Величина LCOE представляет собой среднюю минимальную цену продажи электрической энергии, которая обеспечивает безубыточность генерирующего объекта в течение всего срока эксплуатации [3].

Проблема использования показателя LCOE для анализа экономической эффективности работы электростанций разного типа заключается в том, что не существует единой методики, которая будет строго предписывать нормативы, входящие в состав расчёта LCOE.

Исходя из общепринятого понятия LCOE, представленного в формуле (1), используя данные по укрупнённым технико-экономическим характеристикам

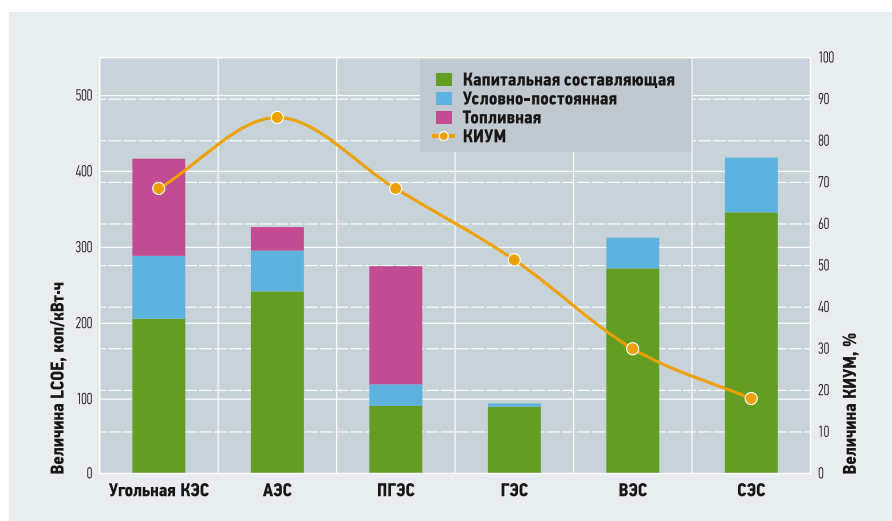


Рис. 2. Величина LCOE при WACC = 8 %

LCOE отражает стоимость вырабатываемого МВт·ч электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла энергоустановки, учитывая плановый КИУМ, капитальные расходы на строительство, операционные расходы, топливо, проценты по кредитам, ремонт и вывод из эксплуатации. LCOE представляет собой среднюю минимальную цену продажи электроэнергии, которая обеспечивает безубыточность генерирующего объекта в течение всего срока эксплуатации

являются парогазовые электростанции (ПГЭС) и гидроэлектростанции. Данные значения проиллюстрированы рис. 1.

Почти аналогичная ситуация наблюдается при снижении средневзвешенной стоимости капитала, то есть средней процентной ставки по всем источникам финансирования проекта, до 8 %. Данные по расчёту проиллюстрированы на рис. 2.

Для более разностороннего анализа экономической эффективности электростанций разного типа следует рассмотреть показатели LCOE, которые были рассчитаны по данным АО «Системный оператор Единой энергетической системы».

Показатель LCOE, рассчитанный на основе укрупнённых ТЭХ*

табл. 1

LCOE, коп/кВт·ч	Угольная КЭС	АЭС	ПГЭС	ГЭС	ВЭС	СЭС
LCOE при WACC = 12 %	522	478	311	186	412	546
Капитальная составляющая	311	393	126	182	371	473
Условно-постоянная	83	54	29	4	41	72
Топливная	128	31	156	—	—	—
LCOE при WACC = 8 %	416	326	274	93	312	418
Капитальная составляющая	205	241	89	88	271	346
Условно-постоянная	83	54	29	4	41	72
Топливная	128	31	156	—	—	—
КИУМ, %	68	86	68	51	30	18

* ТЭХ — технико-экономические характеристики.

Для расчёта показателей LCOE возьмём формулу, которая официально применяется отраслевым регулятором — Ассоциацией НП «Совет рынка»:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{A+B+C}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}, \quad (2)$$

где E_t — выработка электроэнергии объектом генерации в году t ; $A = HBB ДПМ_t$ — необходимая валовая выручка по договорам о предоставлении мощности (ДПМ) в году t ; $B = HBB РСВ_t$ — необходимая валовая выручка на «рынке на сутки вперёд» (РСВ) в году t ; $C = HBB КОМ_t$ — необходимая валовая выручка на рынке конкурентного отбора мощности (КОМ) в году t [3]. Данные по расчёту представлены в табл. 2.

Как видно, показатели LCOE, рассчитанные по формуле (1) и представленные «Системным оператором», разнятся. Для ВЭС и СЭС величина LCOE, предложенная «Системным оператором», более консервативна, однако экономическое превосходство ВЭС над угольной КЭС также очевидно. Наибольшая разница наблюдается у показателя ГЭС, что обусловлено

Сравнение LCOE по технологиям по данным АО «СО ЕЭС»

LCOE, коп/кВт·ч	Угольная КЭС	АЭС	ПГЭС	ГЭС	ВЭС	СЭС
LCOE фактический за 2021 год	520	460	350	650	540	860
КИУМ фактический, %	46	84	46	80	25	25
LCOE перспективный	480	490	330	630	340	610
КИУМ перспективный, %	50	80	50	50	19,7	45

разным подходом к оценке жизненного цикла проекта, а также разницей расчётов капитальных затрат.

В перспективе наибольший рост экономической эффективности и увеличение КИУМ должна иметь солнечная и ветровая генерация, а единственная технология, LCOE которой будет в дальнейшем расти, — это АЭС. Данные табл. 2 показаны на рис. 3.

Факторами, которые положительно влияют на снижение LCOE ВИЭ в России, являются:

1. Рост конкуренции между участниками конкурсных отборов.
2. Перспектива реализации отечественных НИОКР, которые должны улучшить имеющиеся технологии ВЭС, повысить КДП и КИУМ ветроустановок (ВЭУ) и дополнительно снизить себестоимость выработки.
3. В рамках программы поддержки ДПМ ВИЭ 1.0 были предусмотрены требования по локализации, которые стимули-

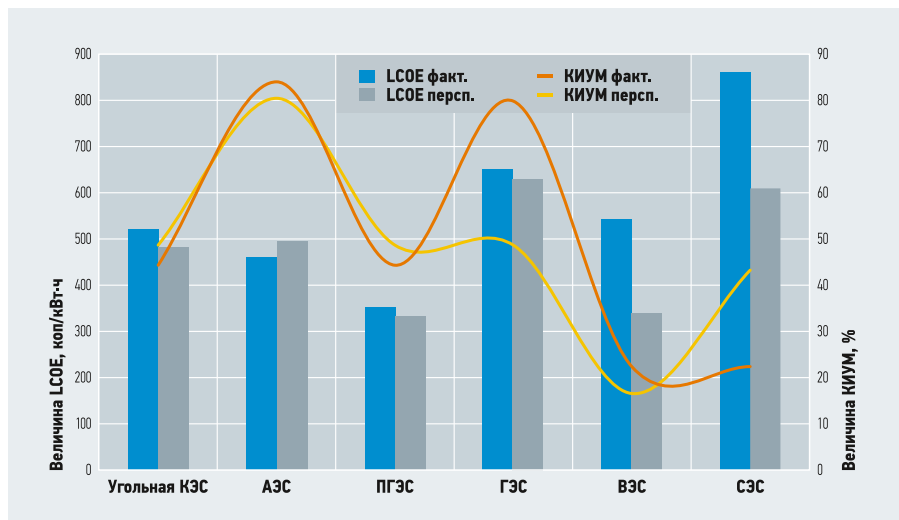


Рис. 3. Сравнение величин LCOE по технологиям по данным АО «СО ЕЭС»

ровали создание отечественных высокотехнологичных производств, основными инвесторами в проекты ветрогенерации выступали Фонд развития ветроэнергетики, АО «НоваВинд» и ПАО «ЭЛ5-Энерго». Основными инвесторами в проекты солнечной генерации стали: ГК «Хевел», ООО «Солар Системс», ПАО «Фортум» и ООО «Вершина Девелопмент». В рамках второй программы на конкурсах 2021 и 2023 годов победителями отборов стали структуры ГК «Юнигрин Энерджи» и ООО «Солар Системс» [5].

табл. 2

что должно стимулировать повышение конкурентоспособности российского генерирующего оборудования на внутренних и внешних рынках [5].

5. Исходя из долгосрочного прогноза темпа роста инфляции, равного 4% ежегодно, перспективы роста цен на энергоресурсы, оборудование и техническое обслуживание для газовых и угольных станций, при условии снижения операционных и капитальных затрат для ВИЭ и роста КИУМ, можно предположить паритет между LCOE ВИЭ и LCOE традиционной генерации к 2030 году [3].

Более того, отмечается, что односта-ночные цены на электроэнергию в рамках проектов ДПМ 1.0 могут быть в сотни раз ниже показателей по некоторым незагруженным тепловым электростанциям (ТЭС). Данные приведены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что в действительности электроэнергия от ВИЭ может быть до 100 раз дешевле ряда ТЭС. Предлагается, чтобы после завершения срока ДПМ генераторы ВИЭ допускались к торговле мощностью в рамках КОМ, увеличивая тем самым предложение. Таким образом, маржинальная цена мощности в КОМ будет снижена [4].

4. В рамках программы ДПМ ВИЭ 2.0 было введение требований по экспорту (отношение объемов экспортной выручки к производству планового годового объема производства электрической энергии и показателя эффективности),

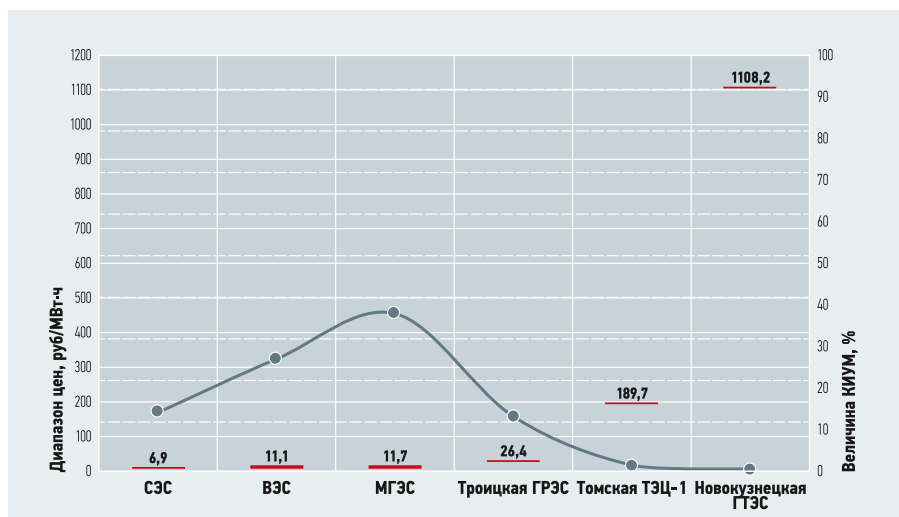


Рис. 4. Ценовая конкуренция ДПМ проектов ВИЭ с традиционными источниками энергии

Рассчётный показатель LCOE при штрафах за выбросы CO₂ электростанций

табл. 3

LCOE, коп/кВт·ч	Угольная КЭС	АЭС	ПГЭС	ГЭС	ВЭС	СЭС
Без штрафа	522	478	311	186	412	546
LCOE при штрафе 1000 руб. за тонну выбросов	647	478	348	186	412	546
LCOE при штрафе 2500 руб. за тонну выбросов	834	478	403	186	412	546

Совокупным итогом к концу 2029 года в рамках первого и второго этапов программы ДПМ ВИЭ по результатам всех прошедших отборов проектов ВИЭ (ОПВ), состоявшихся в 2013–2023 годах (с учётом отказов от исполнения обязательств), будет введено 9,5 ГВт ВИЭ-генерации, в том числе 5,56 ГВт ветрогенерации, 3,65 ГВт солнечной генерации и 0,3 ГВт малой гидрогенерации. Суммарная мощность генерации на основе возобновляемых источников энергии, построенной в рамках ДПМ ВИЭ в период с 2014 по 2035 годы, прогнозируется на уровне 12–13 ГВт. При этом построенные объекты ВИЭ-генерации будут обеспечивать снижение ежегодных выбросов CO₂ к 2035 году в объёме около 15 млн тонн [5].

В конце 2021 года Президент России В.В. Путин поручил Правительству РФ обеспечить достижение нашей страной углеродной нейтральности не позднее 2060 года. При этом учитывается международное признание российских подходов к вопросам, связанным с изменением климата и его последствиями.

В рамках достижения поставленной цели был запущен эксперимент по квотированию выбросов парниковых газов. Теоретически он может проводиться в ряде российских регионов, но фактически ограничен Сахалинской областью. Данный эксперимент регулируется соответствующим федеральным законом и принимаемыми в соответствии с ним подзаконными актами.

В настоящее время идёт активная работа над созданием недостающего нормативного регулирования проведения эксперимента. Так, в частности, было принято Постановление Правительства РФ от 5 августа 2022 года №1390 «Об утверждении Правил исчисления и взимания платы за превышение квоты выбросов парниковых газов в рамках проведения эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов на территории Сахалинской области». Данное постановление вступило в силу с 1 марта 2023 года и действует до 31 декабря 2028 года.

Согласно этому документу, плата за выбросы парниковых газов самостоятельно исчисляется предприятиями, включёнными в перечень региональных регулируемых организаций, осуществляющими деятельность на территории Сахалинской области.

Методика расчёта квот была принята Минэкономразвития России 24 августа 2022 года. Согласно ей, расчёт квот будет строиться на методе исторических выбросов. То есть квота каждого предприятия будет основываться на его выбросах за базовый год и общерегиональной цели по достижению углеродной нейтральности к заданному году. Этот принцип отличается от принципа расчёта квот в системах торговли выбросами в Евросоюзе и Китае, где квота рассчитывается исходя из целевых показателей углеродоёмкости.

Плата за превышение квоты определяется как объём выбросов сверх квоты, умноженный на соответствующую ставку платы. Сверхнормативные выбросы могут быть скорректированы на величину единиц выполнения квоты (результат «перевыполнения» квот другими предприятиями) и/или на объём зачтённых углеродных единиц. Ставка платы установлена Правительством РФ в размере 1000 руб.

Исходя из этого, целесообразно будет проанализировать изменение рассчитанного ранее показателя LCOE для угольных и газовых электростанций с условием платы за выбросы. Данные представлены в табл. 3. Можно видеть, что при штрафах в размере 1000 руб. за тонну выбросов генерация на угольной электростанции становится дороже солнечной, а при штрафах в размере 2500 руб. достигается ценовой паритет между парогазовой электростанцией и ВЭС. Таким образом, Сахалинская область становится крайне привлекательной для развития проектов возобновляемой энергетики.

Более того, большие перспективы для развития ВИЭ возникают в связи с включением неценовых зон Дальнего Востока к ценовым зонам оптового рынка электрической энергии и мощности. При растущих потребностях в энергетических мощностях, высоких ценах на первичное топливо и моральном устаревании генерирующих объектов развитие ВИЭ на Дальнем Востоке может оказаться перспективным направлением.

ДФО обладает существенным потенциалом в ВИЭ: продолжительность солнечного сияния на этой территории свыше 1700 часов в год, а среднегодовая скорость ветра достигает 6–7 м/с

Макрорегион обладает существенным потенциалом в солнечной и ветровой энергетике: продолжительность солнечного сияния на территории ДФО составляет свыше 1700 часов в год, а среднегодовая скорость ветра на прибрежных участках достигает 6–7 м/с [6].

На изолированных и труднодоступных территориях Дальнего Востока использование объектов возобновляемой энергетики экономически оправдано уже сегодня. Драйвером развития ВИЭ на изолированных и труднодоступных территориях выступает высокая стоимость ввозного топлива. Сокращение потребления традиционных энергоресурсов позволяет не только окупить затраты на строительство объектов ВИЭ, но и добиться экономии для региональных и муниципальных бюджетов.

Заключение

Различные подходы к расчёту LCOE электростанций разного может приводить к разбросам по значениям, однако конкурентоспособность возобновляемой энергетики по сравнению с традиционными источниками генерации энергии прослеживается независимо от методологии расчёта.

Присоединение «Объединённой энергосистемы Востока» к территориям рыночного ценообразования представляет для ВИЭ новые возможности ввиду дефицита электроэнергии в данном регионе, быстрой скорости строительства объектов возобновляемой энергетики и низкой стоимости электроэнергии. ●

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года [Электр. текст]. Минэнерго России. Режим доступа: minenergo.gov.ru. Дата обращ.: 02.10.2024.
2. Методические рекомендации по расчёту эффектов от реализации мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности [Электр. текст]. Минстрой России. Режим доступа: minstroyrf.ru. Дата обращ.: 06.10.2024.
3. Чубайс А.Б., Зубакин В.А., Копылов А.Е. Развитие ВИЭ в России: технологии и экономика. Учеб. пособие. — М.: ИГ «Точка», 2020. 464 с.
4. Анализ системных эффектов от реализации программы поддержки возобновляемой энергетики ДПМ ВИЭ 1.0 [Электр. текст]. Ассоциация НП «Совет рынка». Режим доступа: pr-sr.ru. Дата обращ.: 09.10.2024.
5. Рынок возобновляемой энергетики России: текущий статус и перспективы [Электр. текст]. АРВЭ. Режим доступа: rveda.ru. Дата обращ.: 10.10.2024.
6. Развитие конкуренции на рынке электроэнергии в ДФО [Электр. текст]. Аналитический центр при Правительстве РФ. Режим доступа: ac.gov.ru. Дата обращ.: 15.10.2024.
7. Отчёт о функционировании ЕЭС России в 2021 году [Электр. текст]. АО «СО ЕЭС». Режим доступа: so-ups.ru. Дата обращ.: 15.10.2024.
8. Short W., Packey D.J., Holt Th. A manual for the economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies. NREL; U.S. DoE; Midwest Research Institute. Golden, Colorado, U.S. Mart 1995. 120 p.

References — see page 80.

The economic efficiency of renewable energy power plants using the example of the LCOE indicator. Pp. 72–75.

Vasily A. Zubakin, Doctor of Economics, Head of the Department (Basic) of Renewable Energy Sources (RES); **Pavel A. Zhukov**, second-year undergraduate student of the Department (basic) of RES, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow city)

1. *Jenergeticheskaja strategija Rossijskoj Federatsii na period do 2035 goda* [Energy Strategy of the Russian Federation until 2035]. *Minjenergo Rossii* [Ministry of Energy of the Russian Federation]. Web-source: minenergo.gov.ru. Access date: October 2, 2024. [In Russian]
2. *Metodicheskie rekomendatsii po raschetu jeffektov ot realizatsii meroprijatij po jenergosberezheniju i povyszeniju jenergeticheskoy jeffektivnosti* [Methodological recommendations for calculating the effects of implementing energy saving and energy efficiency measures]. *Minstroy Rossii* [Ministry of Construction, Housing and Communal Services of the Russian Federation]. Web-source: minstroyrf.ru. Access date: October 6, 2024. [In Russian]
3. A.B. Chubais, V.A. Zubakin, A.E. Kopylov. *Razvitie VIJe v Rossii: tekhnologii i jekonomika. Ucheb. posobie* [Development of renewable energy sources in Russia: Technologies and economics. A study guide]. Moscow. IG "Tochka" ["A dot" Publishing Group]. 2020. 464 p. [In Russian]
4. *Analiz sistemnykh jeffektov ot realizatsii programmy podderzhki vozobnovljaemoj jenergetiki DPM VIJe 1.0* [Analysis of systemic effects from the implementation of the "Power Supply Agreements for Renewable Energy Sources 1.0" Renewable Energy Support Program]. *Assotsiatsija NP "Sovet Rynka"* ["Nonprofit Partnership Council for Organizing Efficient System of Trading at Wholesale and Retail Electricity and Capacity Market" Association ("NP Market Council" Association)]. Web-source: np-sr.ru. Access date: October 9, 2024. [In Russian]
5. *Rynok vozobnovljaemoj jenergetiki Rossii: tekushij status i perspektivy* [Russian renewable energy market: Current status and prospects]. *AARVJe* [Russia Renewable Energy Development Association (RREDA)]. Web-source: rreda.ru. Access date: October 10, 2024. [In Russian]
6. *Razvitie konkurentsii na rynke jelektroenergii v DFO* [Development of competition in the electricity market in the Far Eastern Federal District of Russia]. *Analiticheskij tsentr pri Pravitel'stve RF* [Analytical Center under the Government of the Russian Federation]. Web-source: ats.gov.ru. Access date: October 15, 2024. [In Russian]
7. *Otchet o funkcionirovanii EJeS Rossii v 2021 godu* [Report on the functioning of the "Unified Energy System of Russia" in 2021]. *AO "SO EJeS"* ["System Operator of the Unified Energy System of Russia", JSC ("SO UES", JSC)]. Web-source: so-ups.ru. Access date: October 15, 2024. [In Russian]
8. Short W., Packey D.J., Holt Th. A manual for the economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies. NREL; U.S. DoE; Midwest Research Institute. Golden, Colorado, U.S. Mart 1995. 120 p.