ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



*Научная статья*

# Перспективы применения генерации на возобновляемых источниках энергии на угледобывающих предприятиях

**Ф.С.НЕПША**[1,2]✉, **К.А.ВАРНАВСКИЙ**[1], **В.А.ВОРОНИН**[1], **И.С.ЗАСЛАВСКИЙ**[1], **А.С.ЛИВЕН**[1]

[1] *Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия*

[2] *РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, Россия*

***Как цитировать эту статью***: Непша Ф.С., Варнавский К.А., Воронин В.А., Заславский И.С., Ливен А.С. Перспективы применения генерации на возобновляемых источниках энергии на угледобывающих предприятиях // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 455-469. EDN LNSCEY

***Аннотация.*** Рассматривается проблема развития возобновляемой энергетики на угледобывающих предприятиях Российской Федерации. Представлена методология оценки технико-экономической эффективности внедрения возобновляемых источников энергии на базе имитационного моделирования. Проведен анализ потенциала солнечной и ветровой энергетики для угледобывающих регионов РФ. С применением авторской программы для ЭВМ выполнено моделирование режима работы системы электроснабжения для следующих сценариев внедрения генерации на возобновляемых источниках энергии: солнечной генерации, ветрогенерации, солнечной генерации с накопителем энергии, ветрогенерации и солнечной генерации. По итогам расчета представлен технико-экономический анализ рассмотренных вариантов на примере Ростовской обл. Выполнен анализ чувствительности инвестиционного проекта в условиях неопределенности развития российской возобновляемой энергетики. Сделан вывод, что даже в условиях создания рынка квот на выбросы $CO_2$ и установления цен на уровне Сахалинского эксперимента возобновляемая энергетика на предприятиях минерально-сырьевого комплекса в РФ остается малопривлекательной и требует дополнительной поддержки.

***Ключевые слова***: энергоэффективность; возобновляемая энергетика; распределенная генерация; декарбонизация угольных шахт; имитационное моделирование

***Благодарность.*** Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2021-138/3).

***Поступила: 02.04.2023*** ***Принята: 20.06.2023*** ***Онлайн: 19.07.2023*** ***Опубликована: 19.07.2023***

**Введение.** В соответствии с ратифицированными Киотским протоколом к Рамочной конвенции ООН об изменении климата, Парижским соглашением, а также договоренностями, принятыми на Конференции об изменении климата в Глазго (2021) и Шарм-эль-Шейхе (2022), Российская Федерация взяла на себя обязательства по сокращению углеродного следа за счет декарбонизации экономики [1]. Многие страны активно вводят углеродные платежи, заявляют о полном отказе от ископаемых энергоресурсов, включая уголь, и ставят цель достижения углеродной нейтральности в период 2045-2060 гг. [2]. Несмотря на это, угольная промышленность продолжает играть существенную роль в мировой энергетике. По данным на 2021 г.[1], уголь обеспечивал около 27 % мирового энергопотребления (10,9 % в России), а на долю электроэнергетики приходилось 36,7 % потребления угля в мире (17,3 % в России). Особенно велика доля использования угля в странах Азии: Китай – 62,93, Индия – 74,17, Индонезия – 61,46 %. По данным аналитических отчетов EIA и IEA, уголь сохранит значительную роль в электроэнергетике вплоть до 2050 г. Таким образом, несмотря на активное лоббирование мер по декарбонизации экономики и постоянному увеличению объемов использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), угольная промышленность остается важной составляющей глобального энергетического баланса.

[1] *Ritchie H., Roser M., Rosado P.* Energy. URL: https://ourworldindata.org/energy (дата обращения 14.04.2023).



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

© Ф.С.Непша, К.А.Варнавский, В.А.Воронин, И.С.Заславский, А.С.Ливен, 2023

Однако внедрение стратегии декарбонизации экономики не единственный вызов для угольной отрасли России. Беспрецедентное санкционное давление, переориентация на новые рынки сбыта в страны Юго-Восточной Азии и Индийского океана, увеличение логистической цепи и стоимости перевозок, волатильность экспортных цен также являются серьезными внешними шоками для угольной промышленности России [3]. Особую важность приобретает повышение конкурентоспособности российских угольных компаний за счет введения современных технологий, таких как IoT (интернет вещей) и Big Data (большие данные), а также энергетической эффективности электроснабжения угольных предприятий [4]. Внедрение угольными компаниями высокоэффективных технологий, в том числе цифровых, в процессах добычи и переработки угля предусмотрено Программой развития угольной промышленности России на период до 2035 г. Крупные инвестиции также направлены на создание комплекса технологий, повышающих эффективность угледобычи и углепереработки[2].

Одним из путей снижения углеродного следа России без ущерба для угольной промышленности является «озеленение» внутреннего электропотребления угольных шахт за счет внедрения распределенной генерации. В исследованиях [5, 6] отмечены возможности снижения расходов на покупку электроэнергии из сети и объемов выбросов углекислого газа угольными шахтами при использовании собственной генерации на шахтном метане. Актуальность и необходимость генерации на ВИЭ в условиях предприятий минерально-сырьевого комплекса (МСК) обоснована в работе [7]. В статье [8] рассмотрены возможности интеграции собственной генерации на основе ВИЭ для предприятий МСК, дана положительная оценка использованию ВИЭ для обеспечения электро- и теплоснабжения. Работа [9] посвящена исследованию эффективности применения гибридных энергетических комплексов на основе солнечных, ветряных и дизельных электростанций, а также замены дизельного транспорта на водородный для угольных шахт Северного Китая. Отмечен высокий потенциал по сокращению выбросов $CO_2$ и снижению расхода дизельного топлива. В исследовании [10] проведена оценка эффективности внедрения когенерации на шахтном метане и отмечена значительная зависимость инвестиционной привлекательности проекта от тарифов на выбросы $CO_2$. Известен ряд проектов по использованию ВИЭ на предприятиях МСК: внедрение мобильных солнечных электростанций компании SunShift (Австралия) на угольных разрезах[3], гибридной солнечной электростанции мощностью 36 МВт на золотодобывающей шахте на юго-западе Мали[4], карьерных самосвалов с электродвигателями и последующим развитием инфраструктуры заряда электротранспорта в качестве одного из вариантов диверсификации бизнеса.

В перечисленных работах отмечается, что использование ВИЭ в системах электроснабжения предприятий МСК позволит снизить углеродный след, себестоимость угледобычи за счет сокращения затрат на энергоресурсы, а также повысить надежность, сократить финансовый ущерб от перерывов электроснабжения и создать новые высокотехнологичные рабочие места.

**Постановка проблемы.** Использование ВИЭ на промышленных предприятиях рассматривалось многими учеными. В работе [11] проанализирована возможность достижения энергетической независимости промышленных предприятий за счет применения ВИЭ. Отмечено, что внедрение ВИЭ в энергосистемы общего пользования вызывает определенные трудности, связанные с ростом цен на электроэнергию, сложностью управления и снижением надежности. При этом сделан вывод о хороших перспективах применения ВИЭ в качестве децентрализованных источников энергии в системах энергоснабжения промышленных предприятий, т.е. источников энергии только для потребителей предприятия без возможности выдачи энергии в сеть общего пользования.

[2] Распоряжение Правительства РФ от 11.05.2022 № 1144-р «Об утверждении комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения».

[3] SunSHIFT Global Fleet of Modular Moveable Megawatt Scale Solar Assets. URL: https://www.climatefinancelab.org/ideas/sunshift-global-fleet-of-modular-moveable-megawatt-scale-solar-assets/ (дата обращения 20.06.2023).

[4] *Takouleu J.M.* MALI: Reuniwatt to buid weather forecasting system for Fekola solar hybrid power plant. URL: https://www.afrik21.africa/en/mali-reuniwatt-to-buid-weather-forecasting-system-for-fekola-solar-hybrid-power-plant/ (дата обращения 11.03.2023).


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

В исследовании [12] предложена система управления энергетической гибкостью на промышленных предприятиях. Результаты показывают положительный эффект от внедрения ВИЭ на промышленном предприятии при развитии рынка энергетической гибкости. В статье [13] сделан вывод о высоком потенциале возобновляемых источников на территории РФ после оценки данных о солнечной активности и скорости ветра в регионах. Отмечается несовпадение периодов максимума солнечной радиации и скорости ветра для ряда регионов РФ в течение суток. В связи с этим рекомендовано использование гибридных электростанций «солнце – ветер» для минимизации установленной мощности генерации в микрогридах. К подобному выводу приходят зарубежные исследователи [14], которые рассмотрели применение гибридной электростанции (фото- и ветроэлектростанция). Такой вариант обеспечил снижение затрат на электроэнергию с 5300000 до 2400000 дол./г и получение дополнительной прибыли от продажи электроэнергии в сеть 1300000 млн дол./г при сроке окупаемости проекта около шести лет.

Ученые университета Цинхуа [15] изучают задачу выбора оптимального сочетания солнечной генерации, ветрогенерации и биогазовой генерации для электрификации сельской местности. Рассмотрено множество вариантов развития сети с внедрением различных сочетаний генерации на ВИЭ. Наиболее целесообразным оказался гибридный, где сеть поселка может работать параллельно и изолированно от энергетической системы. Отмечено положительное влияние внедрения объектов распределенной энергетики на окружающую среду и социальные аспекты.

В качестве решения для повышения надежности электроснабжения нефтедобывающего сектора в работе [16] рассмотрено использование ветро-дизельных установок для питания погружных электродвигателей электроцентробежных насосов на скважинах нефтедобычи. В статье [17] исследовано внедрение на объектах нефтедобычи когенерационной установки с возможностью дополнительной электрогенерации при малой потребности в тепле. Такая система может быть перспективна на угольных шахтах с применением метана в качестве первичного энергоносителя.

В работе [18] китайскими исследователями представлена гибридная система энергоснабжения, включающая ветровые и солнечные генерирующие источники, а также гидроаккумулирующую электростанцию (ГАЭС). ГАЭС выступает в качестве резервного источника энергии в безветренные дни и дни с повышенной облачностью, обеспечивая устойчивость работы системы энергоснабжения. В качестве резервуаров для хранения воды предлагается использовать отработанные подземные горные выработки угольных шахт Нинся-Хуэйского автономного района Китая. Подобный вариант предложен испанскими учеными [19] для условий отработанных угольных шахт Астурийского угольного бассейна Испании. Представлены гидродинамические модели, отражающие движение потоков шахтных вод. Отмечается, что отсутствие подобных моделей тормозит реализацию проектов по созданию ГАЭС в условиях подземных выработок из-за невозможности оценки их эффективности. В работе [20] эти же исследователи анализируют технико-экономическую целесообразность использования шахтной воды из затопленных угольных шахт для обеспечения тепловой и электрической энергией потребителей, расположенных в близлежащих районах. Разработанная экономическая модель показывает, что эксплуатационные качества подобной системы энергоснабжения зависят от многих факторов, но при должной проработке вариантов реализации могут оказаться весьма эффективными и позволят оптимизировать расходы потребителей на энергоснабжение, а также снизить выбросы углекислого газа в окружающую среду.

В статье [21] рассмотрена проблема определения оптимального расположения ГАЭС в условиях подземных выработок на примере китайской провинции Шаньси. В основу исследования положен многокритериальной метод принятия решения, приводится четыре оценочных критерия, представлен ряд количественных показателей для реальных примеров. Отмечается необходимость совершенствования метода введением дополнительных оценочных критериев.

Еще одно исследование по проблеме оптимального расположения ГАЭС в подземных выработках закрытых шахт, проведенное европейскими учеными, представлено в работе [22]. Приведена математическая модель, с помощью которой оценивается влияние гидрогеологических факторов, химического состава пород и др. при выборе места размещения подземной ГАЭС.

В статье [23] представлен анализ текущего состояния и тенденций применения ВИЭ предприятиями австралийской горной промышленности. Отмечены как факторы, стимулирующие использование ВИЭ горными предприятиями, так и проблемы, препятствующие их широкому внедрению.


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

© Ф.С.Непша, К.А.Варнавский, В.А.Воронин, И.С.Заславский, А.С.Ливен, 2023

При этом указывается, что из-за недостаточной научно-технической проработки вопросов применения ВИЭ на предприятиях МСК процент горных предприятий Австралии, использующих ВИЭ, остается низким и составляет порядка 7 %.

Работа [24] посвящена исследованию возможностей оптимизации энергопотребления при помощи использования ВИЭ на примере зимбабвийских шахт. Показано, что использование традиционных методов повышения энергоэффективности (оптимизация режима работы, повышение коэффициента мощности и т.п.) без ВИЭ является самым оптимальным вариантом с точки зрения экономической эффективности. Однако ВИЭ могут быть эффективными при проработке механизмов их окупаемости.

В статье [25] предлагается разработанный многокритериальный алгоритм работы диспетчерского центра комплексной энергетической системы, использующей в качестве первичных энергоносителей шахтный метан, шахтные воды и т.п. Алгоритм опробован в условиях угольной шахты и позволяет решать широкий спектр задач от оптимизации энергопотребления и повышения надежности энергоснабжения до сокращения выбросов парниковых газов.

В работе [26] предложена модель комплексной системы энергоснабжения угольной шахты с устройствами накопления энергии и ВИЭ. На этой модели при использовании реальных данных одной из угольных шахт Западного Китая был отработан алгоритм двухстадийной оптимизации системы энергоснабжения в условиях неопределенности. Результатом применения алгоритма явилась возможность оптимальной загрузки энергетического оборудования, позволяющая повысить энергоэффективность и надежность системы энергоснабжения угольной шахты.

Исследователями из Виргинского университета в статье [27] предложена концепция использования отработанных нефтяных и газовых скважин, а также отработанных подземных горных выработок угольных шахт в качестве накопителей сжатого воздуха, которые могут применяться для стабилизации работы близлежащих ветряных электростанций в безветренные дни. Отмечается сложность реализации подобных проектов, но при этом указывается на существенный социально-экономический эффект от развития инфраструктуры, создания новых рабочих мест, а также толчок в развитии горной науки в направлении поиска и обоснования альтернативных подходов к эксплуатации горных выработок.

В статье [28] исследуется возможность применения низкопотенциальных источников тепла, характерных для предприятий угольной промышленности. Представлена принципиальная схема комплексной переработки шахтных вод с получением тепловой энергии, питьевой и технической воды (пригодной, например, для агропромышленного комплекса). По мнению авторов, использование предложенной схемы позволит повысить надежность теплоснабжения промышленных и бытовых потребителей, а также снизить негативное воздействие угольной промышленности на окружающую среду.

В работе [29] представлено тематическое исследование, посвященное возможностям использования подземных выработок угольных шахт в качестве ГАЭС, накопителей энергии сжатого воздуха, а также источников геотермальной энергии. Отмечается, что энергетический потенциал подземных выработок составляет порядка 197 ГВт·ч/г при значительном сокращении выбросов $CO_2$.

В статье [30] приводятся результаты использования шахтных вод затопленного медного рудника в штате Мичиган (США) в качестве источника тепловой энергии для близлежащих потребителей. Сделан вывод о высокой эффективности предлагаемых решений. Отмечается, что опыт применения данных технологий может быть использован не только в США, но в других горнодобывающих регионах мира.

Тема оптимального использования шахтных вод в качестве источника энергии в условиях закрытой шахты Маркхэм Кольери (Великобритания) приведена в работе [31], где исследуется химический состав шахтных вод, предлагаются мероприятия по повышению эффективности работы энергетического оборудования, а также увеличению срока его службы.

Статья [32] посвящена исследованию алгоритма управления электротехническим комплексом, включающим ветроэнергетическую установку, аккумуляторные батареи и дизель-генератор. Отмечено, что учет в алгоритме управления климатических факторов и прогнозных данных по энергопотреблению на сутки вперед повышает эффективность работы системы электроснабжения. Использование полученных результатов актуально при анализе моделей систем электроснабжения


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2023. Т. 261. С. 455-469
© Ф.С.Непша, К.А.Варнавский, В.А.Воронин, И.С.Заславский, А.С.Ливен, 2023

с ВИЭ для отечественных предприятий МСК, так как климатические условия в местах разработки месторождений полезных ископаемых в России могут кардинально отличаться.

Несмотря на значительное количество исследований в области внедрения ВИЭ на промышленных предприятиях, вопрос об их эффективности на угледобывающих предприятиях РФ остается недостаточно проработанным и требует дополнительных исследований для оценки целесообразности внедрения ВИЭ на стадиях строительства и модернизации предприятий. Эффективность возобновляемой генерации и ее включение в систему электроснабжения угольной шахты оцениваются с использованием авторской программы для ЭВМ, разработанной на языке программирования Python и специализированных библиотек pvlib и windpowerlib.

**Методология.** Существует ряд зарубежных программ, позволяющих провести имитационное моделирование гибридной системы электроснабжения. Среди них HOMER, iHOGA, PVsyst, SAM, RETScreen Expert, EnergyPlan и многие другие [33]. Наиболее эффективной и удобной является HOMER PRO, которая превосходит другие программы с аналогичным функционалом [34]. Но программа Homer PRO не учитывает особенности российского рынка электрической энергии и мощности. Возникает необходимость разработки отечественных программ, которые могли бы учесть эти особенности и в дальнейшем использоваться для предварительного тестирования и отработки систем управления объектами распределенной энергетики. Ниже приводится описание разработанной авторами программы для ЭВМ, выполняющей следующие функции:

• генерация профиля выработки электрической энергии на ВИЭ с применением данных о местоположении, с учетом сезонности и заданной установленной мощности;

• формирование годового баланса для гибридной системы электроснабжения при использовании оптимальных алгоритмов управления;

• построение финансово-экономической модели, позволяющей оценить чувствительность инвестиционного проекта и риски его реализации.

Отметим, что зарубежное программное обеспечение теоретически может решить эти проблемы, однако возникают сложности при реализации финансово-экономической модели для российского рынка электрической энергии. При этом используемые алгоритмы оптимизации не описаны достаточно подробно, чтобы их можно было реализовать в рамках реальной системы управления. По мнению авторов ПО, для выбора оптимального состава оборудования гибридная система электроснабжения и ее автоматизированная система управления должны быть связаны между собой общими алгоритмами управления. Это позволит с высокой степенью достоверности гарантировать, что результаты, полученные в ходе оптимизации состава оборудования, будут соответствовать реальному опыту эксплуатации системы управления.

*Структура имитационной модели*. На рис.1 представлена схема модели системы электроснабжения предприятия МСК, на котором рассматривается внедрение ВИЭ. В состав такой модели входят следующие компоненты:

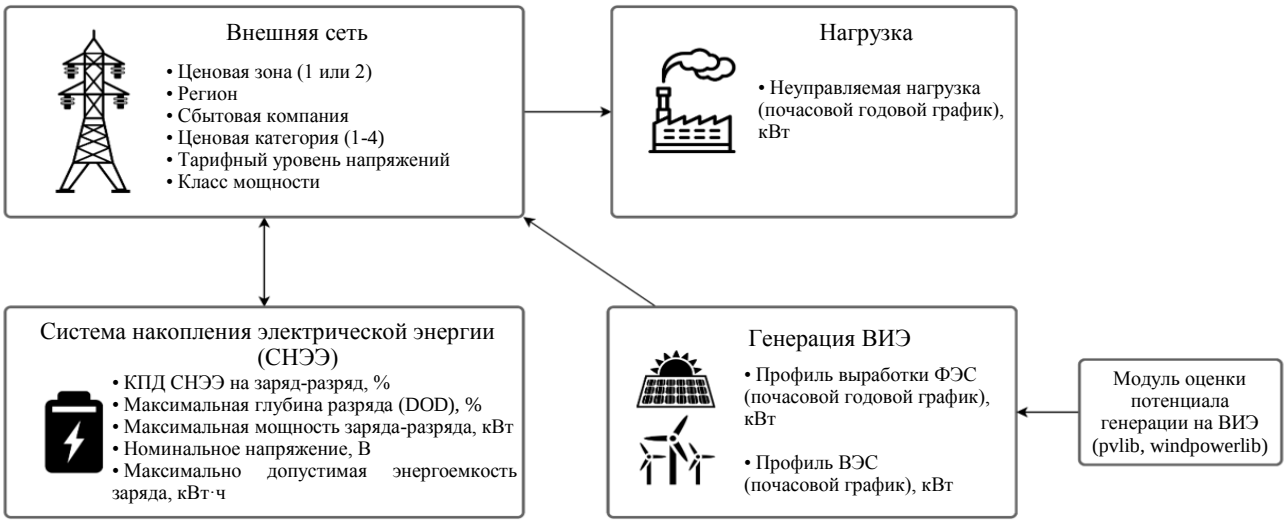



Рис.1. Структурная схема имитационной модели гибридной системы электроснабжения


Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Ф.С.Непша, К.А.Варнавский, В.А.Воронин, И.С.Заславский, А.С.Ливен, 2023

• внешняя электрическая сеть, параметры которой определяются регионом подключения предприятия МСК, а также договором купли-продажи электрической энергии и договором на услуги по передаче электрической энергии. В некоторых случаях для небольших предприятий со сбытовой компанией может заключаться только один договор энергоснабжения;

• электрическая нагрузка, представленная горно-шахтным оборудованием и собственными нуждами объектов распределенной энергетики. В имитационной модели для задания профиля потребления используется график нагрузки одной из угольных шахт Кузбасса. Допускается, что он подобен графику нагрузки для угольных шахт других регионов. Учитывая круглосуточный режим работ предприятий, такое допущение вполне приемлемо;

• генерация ВИЭ состоит из ветровой электростанции (ВЭС) и (или) фотоэлектрической электростанции (ФЭС). В рамках имитационного моделирования сначала выполняется формирование профиля генерации с использованием библиотек pvlib и windpowerlib. Далее в расчетах используются годовые профили ветро- и солнечной генерации;

• система накопления электрической энергии (СНЭЭ) представлена подсистемами накопления (аккумуляторная батарея) и преобразования (инвертор).

*Алгоритм технико-экономической оценки внедрения ВИЭ* представлен на рис.2 и включает следующие этапы:

• Задание местоположения. Осуществляется ввод координат рассматриваемого объекта, которые используются при формировании запросов к внешним сервисам.

• Загрузка данных из внешних сервисов. Формируются запросы данных по метеорологическим параметрам (солнечная радиация, температура воздуха, атмосферное давление, скорость ветра) с использованием API NASA POWER.

• Задание профиля электропотребления. Выполняется ввод профилей электропотребления электрооборудования.

• Задание параметров генерирующего оборудования. Выполняется ввод параметров основного оборудования гибридного энергетического комплекса: солнечная электростанция, ВЭС, СНЭЭ.

• Формирование профиля генерации ВИЭ. Осуществляется на основе данных о местоположении объекта и заданных параметров по номинальным мощностям ФЭС, ВЭС и СНЭЭ. Для расчета профилей генерации ФЭС и ВЭС используются python-библиотеки pvlib и windpowerlib, позволяющие учитывать основные характеристики фотоэлектрических панелей с инверторами и параметры ветротурбин.

• Имитационное моделирование и расчет балансов. Выполняется расчет балансов, а именно профилей потребления мощности из электрической сети с использованием полученных профилей генерации ВИЭ и заданного профиля электрической нагрузки. При наличии СНЭЭ обеспечивается его оптимальное управление с целью снижения потребления мощности в час пиковой нагрузки и поглощения избытка генерации ВИЭ.

• Расчет NPV и LCOE. Для оценки энергоэффективности рассматриваемой гибридной системы электроснабжения выполняется расчет чистого дисконтированного дохода (NPV) и нормированной стоимости электроэнергии (LCOE):

$$\mathrm{NPV} = \sum_{n=1}^{N} \frac{CF_n}{(1+i)^n} - \mathrm{CAPEX}, \qquad (1)$$

где $CF_n$ – денежный поток за $n$-й год; CAPEX – вложенный инвестиционный капитал; $N$ – продолжительность проекта, лет; $i$ – ставка дисконтирования, принятая на уровне 7,5 %.

В части доходов экономическая модель учитывает получаемую экономию за счет снижения объемов электроэнергии, покупаемой из сети, а также штрафов за косвенные выбросы углекислого газа в атмосферу. В части расходов – капитальные вложения в покупку оборудования и операционные расходы, включающие регулярное техническое обслуживание.

Для оценки рентабельности генерации на ВИЭ выполняется расчет приведенной стоимости электроэнергии, представляющей собой стоимость производства одного киловатта в час электроэнергии в течение всего жизненного цикла проекта:


Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

*Записки Горного института.* 2023. Т. 261. С. 455-469
© Ф.С.Непша, К.А.Варнавский, В.А.Воронин, И.С.Заславский, А.С.Ливен, 2023

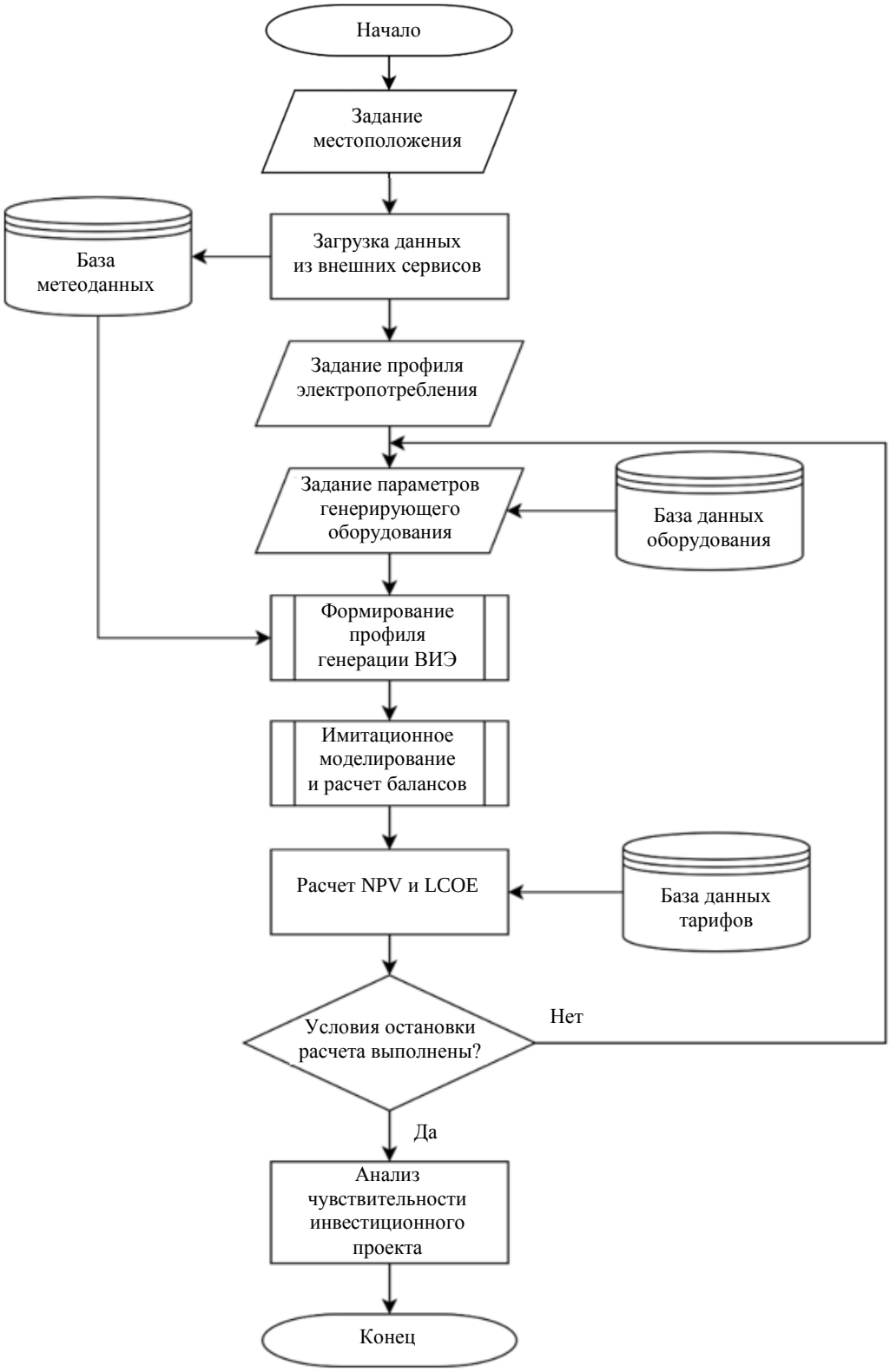



Рис.2. Алгоритм технико-экономической оценки внедрения ВИЭ на предприятии МСК

$$\mathrm{LCOE} = \frac{\mathrm{EUAC}}{E_{\text{ген}}}, \qquad (2)$$

где EUAC – эквивалентная годовая стоимость с учетом дисконтирования, млн руб./г; $E_{\text{ген}}$ – генерация электроэнергии за год, ГВт·ч.



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Ф.С.Непша, К.А.Варнавский, В.А.Воронин, И.С.Заславский, А.С.Ливен, 2023

Эквивалентная годовая стоимость с учетом дисконтирования определяется по формуле

$$\mathrm{EUAC} = \mathrm{NPC}\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1}, \tag{3}$$

где NPC – чистая приведенная стоимость, млн руб.,

$$\mathrm{NPC} = \sum_{t=0}^{N}\frac{\mathrm{OPEX}_n}{(1+i)^n} + \mathrm{CAPEX}, \tag{4}$$

$\mathrm{OREX}_n$ – операционные затраты в $n$-й год, млн руб.

Снижение косвенного углеродного следа за год рассчитывается по формуле (3):

$$\mathrm{CO}_{2\,\text{сниж}} = 1000 EF_{\mathrm{CO}_2,\,\text{год}} E_{\text{ген}}, \tag{5}$$

где $EF_{\mathrm{CO}_2,\,\text{год}}$ – коэффициент выбросов диоксида углерода $CO_2$, т/МВт·ч, принятый по данным сайта АО «АТС»[5].

В качестве условия для остановки расчета принято условие максимизации NPV:

$$\max \mathrm{NPV}\left(P_{\text{ФЭС}}, P_{\text{ВЭС}}, P_{\text{СНЭЭ}}\right) \text{ при} \begin{cases} 0 \le P_{\text{ФЭС}} \le P_{\text{ФЭСmax}}; \\ 0 \le P_{\text{ВЭС}} \le P_{\text{ВЭСmax}}; \\ 0 \le P_{\text{СНЭЭ}} \le P_{\text{СНЭЭmax}}, \end{cases} \tag{6}$$

где $P_{\text{ФЭС}}$, $P_{\text{ВЭС}}$, $P_{\text{СНЭЭ}}$ – установленные мощности ФЭС, ВЭС и СНЭЭ, МВт; $P_{\text{ФЭСmax}}$, $P_{\text{ВЭСmax}}$, $P_{\text{СНЭЭmax}}$ – максимальные значения установленной мощности ФЭС, ВЭС и СНЭЭ, ограничивающие область поиска оптимального решения, МВт.

Наряду с экономическими эффектами также рассчитывались социальные. Согласно статье [35], потенциал ФЭС к образованию новых рабочих мест составляет $0{,}27549 \cdot 10^{-7}$ кВт·ч/г.

• Анализ чувствительности инвестиционного проекта. Определяется чувствительность срока окупаемости к изменению удельной стоимости установленной мощности ФЭС, ВЭС, СНЭЭ, ставки дисконтирования, стоимости электрической энергии и мощности. Разработанная программа для ЭВМ может быть использована для подбора оптимальной конфигурации генерации на ВИЭ на других промышленных предприятиях.

**Обсуждение результатов.** В качестве объекта исследования рассмотрена система электроснабжения угольной шахты. Для моделирования электропотребления использован временной ряд почасовых измерений потребляемой мощности за 2020 г., полученный от одной из угольных шахт Кемеровской обл. Данный массив охватывает временной период в один год и включает 8784 измерения. Дальнейший анализ выполнен при допущениях о том, что такой временной ряд с достаточной точностью характеризует профили электропотребления угледобывающих предприятий России, а также незначительно изменяется на горизонте оценки экономического эффекта представленных в работе решений. Рассматриваемая шахта работает в круглосуточном режиме. Среднегодовое потребление угольной шахты составляет 8,51 МВт. Сезонный и суточный профили нагрузки представлены на рис.3. По данным рис.3, *а* видно, что пики потребления угольной шахты чаще всего приходятся на период после полудня – 20 ч 00 мин по местному времени. При этом почасовые значения потребления могут колебаться от 2,6 до 17 МВт. Заметна цикличность технологического процесса угольной шахты. Наиболее нагруженными часами являются 3-4, 12 и 17 ч. Отмеченные интервалы максимальной нагрузки частично попадают в плановые часы пиковые нагрузки для оптового и розничного рынков, а также в час пиковых нагрузок в субъекте РФ. По данным рис.3, *б* видно, что нагрузка шахты имеет минимальное значение в летние месяцы и максимальное потребление в осенний и весенний периоды. Сезонные колебания потребления

[5] Коэффициент выбросов диоксида углерода по Первой синхронной зоне ЕЭС России АО «АТС». URL: https://www.atsenergo.ru/results/CO2 (дата обращения 05.08.2022). Для расчетов принято фактическое значение коэффициента выбросов $CO_2$ за 2022 год – 0,348 т/МВт·ч.


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2023. Т. 261. С. 455-469
© Ф.С.Непша, К.А.Варнавский, В.А.Воронин, И.С.Заславский, А.С.Ливен, 2023

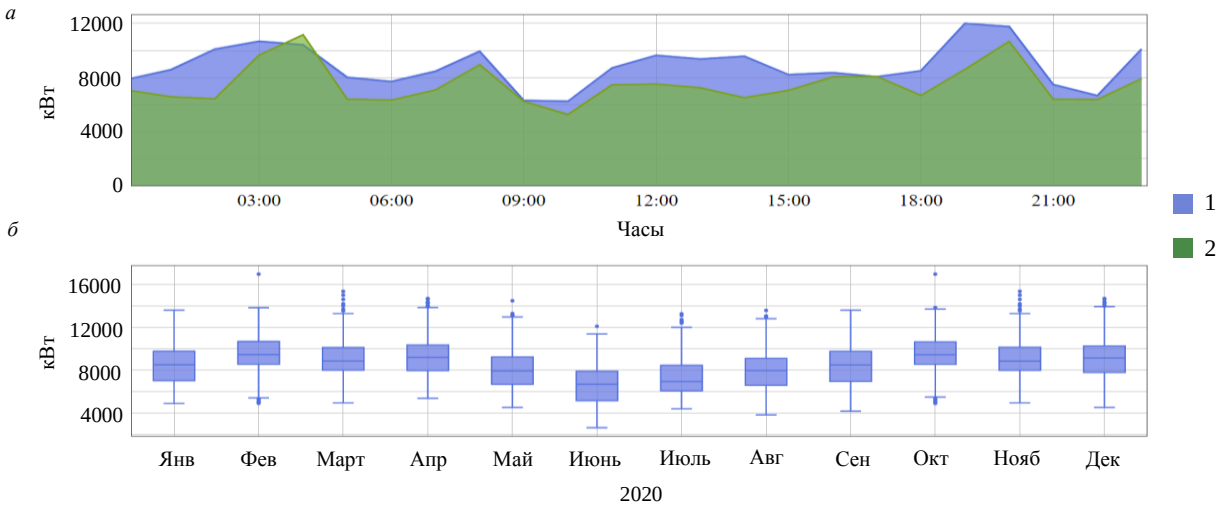



Рис.3. Профили нагрузки рассматриваемой угольной шахты: *а* – суточный профиль; *б* – годовой профиль
1 – зима; 2 – лето

угольной шахты составляют около 25 %. Дальнейшее рассмотрение эффективности внедрения ВИЭ производится для основных угледобывающих регионов РФ.

Среднегодовые значения параметров, характеризующих потенциал ВИЭ угледобывающих регионов, представлены в табл.1. Данные табл.1 показывают, что наибольшим потенциалом солнечной энергии обладает Ростовская обл. – суммарная солнечная инсоляция в ней выше на ~25-30 %, чем в остальных рассмотренных регионах. Отметим, что наибольшее значение солнечной активности фиксируется в июне, тогда как наименьшее в декабре. Индекс чистоты неба колеблется для регионов в пределах от 0,55 в зимние месяцы до 0,72 о.е. в весенний период.

*Таблица 1*

**Среднегодовые значения параметров по регионам**

| Параметр | Ростовская обл. | Республика Саха | Кемеровская обл. | Сахалинская обл. | Забайкальский край | Приморский край | Красноярский край | Республика Коми | Республика Хакасия |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Солнечная инсоляция за день, кВт·ч/м$^2$ | 3,85 | 2,98 | 3,01 | 3,09 | 3,36 | 3,62 | 2,66 | 2,29 | 3,31 |
| Индекс чистоты неба, о.е. | 0,66 | 0,66 | 0,66 | 0,69 | 0,72 | 0,7 | 0,66 | 0,61 | 0,68 |
| Скорость ветра, м/с | 6,80 | 3,66 | 5,57 | 5,26 | 4,89 | 4,54 | 5,52 | 4,76 | 5,25 |

Показатели скорости ветра были получены из базы данных NASA[6] для высоты поверхности 50 м. На рассмотренных территориях значение средней скорости ветра в течение года варьируется от 3 до 9 м/с. Наибольшим потенциалом ветровой энергии обладает Ростовская обл. со среднегодовым значением скорости ветра 6,8 м/с, наименьшим – Республика Саха со значением 3,66 м/с, что ниже на 54 %. Наибольшая скорость ветра наблюдается в зимние и весенние месяцы.

Наиболее привлекательным регионом для внедрения ВЭС и ФЭС оказалась Ростовская обл., имеющая наибольший потенциал для ветро-гелиоэнергетики. Далее рассматривается установка генерации на ВИЭ только в Ростовской обл. как наиболее привлекательного региона с точки зрения потенциала ВИЭ.

Осуществляется имитационное моделирование и расчет балансов. Структурные схемы представлены на рис.4. Удельные значения капитальных и операционных затрат, принятые для имитационного моделирования, определены в результате анализа Приказа Минэнерго России[7] и представлены в табл.2.

[6] NASA Prediction of Worldwide Energy Resources. URL: https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ (дата обращения 01.03.2023).

[7] Приказ Минэнерго России от 28.02.2022 № 146 «Об утверждении схемы и программы развития единой энергетической системы России на 2022-2028 годы».



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Ф.С.Непша, К.А.Варнавский, В.А.Воронин, И.С.Заславский, А.С.Ливен, 2023

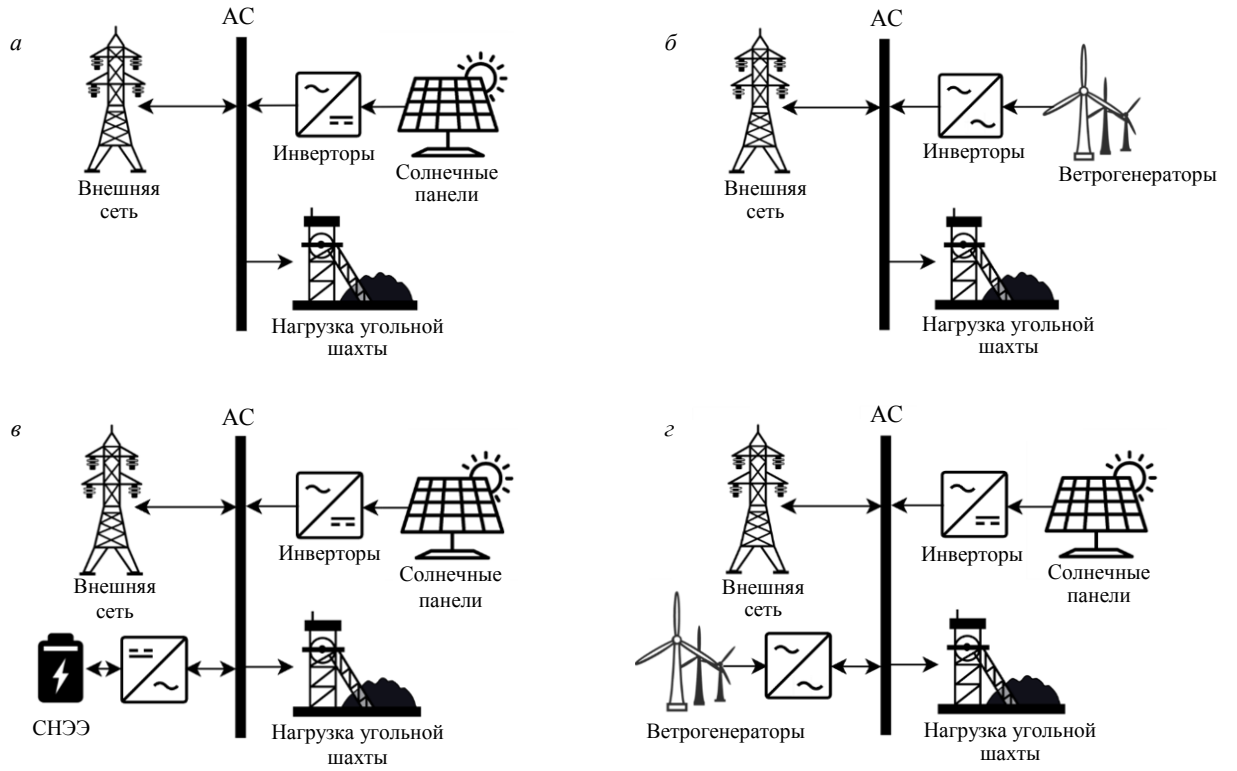



Рис.4. Рассматриваемые варианты гибридного энергетического комплекса: *а* – солнечная генерация; *б* – ветрогенерация; *в* – солнечная генерация и система накопления энергии; *г* – солнечная генерация и ветрогенерация

*Таблица 2*

**Удельные значения капитальных и операционных затрат**

| Элемент гибридной СЭС | ФЭС | ВЭС | СНЭЭ |
|---|---|---|---|
| Капитальные затраты[8] | 800 дол./кВт/ 61850 руб./кВт | 2000 дол./кВт/ 154650 руб./кВт | 800 дол./кВт·ч/ 61850 руб./кВт |
| Операционные затраты за год | 23 дол./кВт/ 1778 руб./кВт | 100 дол./кВт/ 7732 руб./кВт | 12 дол./кВт/ 928 руб./ кВт |

Для подбора установленной мощности солнечных панелей был использован метод покоординатного спуска [36] – постепенное уменьшение установленной мощности ФЭС, начиная со значения, равного пиковому потреблению рассматриваемой угольной шахты. При этом с помощью библиотеки pvlib осуществлялся подбор необходимого количества солнечных панелей и инверторов. Критерием для оптимизации выступал чистый дисконтированный доход за 10 лет (6). В процессе поиска оптимальной конфигурации было установлено, что оптимальная установленная мощность ФЭС для Ростовской обл. составляет 8 МВт (51040 поликристаллических солнечных панелей ET-P660255WWAC от компании ET Solar Industry мощностью 255 Вт и размером 1640×992 мм) с занимаемой площадью 15 га. На рис.5 приведен график энергетического баланса угольной шахты в период максимальной солнечной генерации. Подбор установленной мощности ВЭС выполнялся аналогичным образом. Оптимальным вариантом оказалась установка одной ветровой турбины марки E-53/800 суммарной установленной мощностью 0,8 МВт. В случае внедрения СНЭЭ и ФЭС в качестве исходной мощности для ФЭС было принято значение установленной мощности ФЭС, определенное в первом сценарии. При этом накопитель использовался для ценового арбитража и поглощения избыточной солнечной генерации в часы максимума солнечной активности с целью дальнейшего разряда в часы пиковой нагрузки. На рис.6 приведен график работы СНЭЭ. Данные на рисунке показывают, что накопитель заряжается в часы максимума солнца, разряд происходит

[8] Принятый в расчетах курс – 77,32 руб./дол.


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2023. Т. 261. С. 455-469
© Ф.С.Непша, К.А.Варнавский, В.А.Воронин, И.С.Заславский, А.С.Ливен, 2023

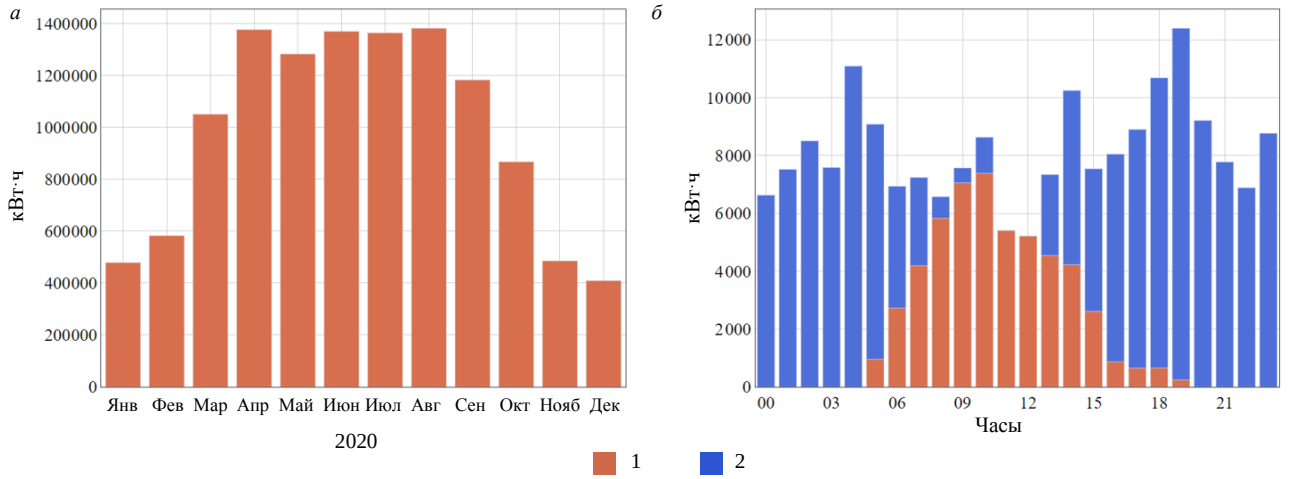



Рис.5. Сезонный (*а*) и суточный (*б*) профили генерации ФЭС установленной мощностью 8 МВт в Ростовской обл.
1 – солнечная генерация; 2 – потребление из сети

в час с признаком часа пиковой нагрузки для получения дополнительного эффекта. В табл.3 представлено сравнение рассмотренных вариантов. Значение LCOE находится в пределах от 0,07 до 0,1 дол./кВт·ч (от 5,41 до 7,73 руб./кВт·ч), что выше мирового уровня, составляющего 0,048 по данным IRENA в 2021 г.[9] Рассматриваемые варианты не окупаются за изучаемый период в 20 лет, что главным образом вызвано невысокой стоимостью электроэнергии и символическими штрафами за выбросы $CO_2$ (16 руб. за 1 т $CO_2$).

Анализ чувствительности инвестиционного проекта приведен для рассматриваемого варианта внедрения СНЭЭ и ФЭС в Ростовской обл. Поскольку наибольшее влияние на NPC оказывает удельная стоимость ФЭС и СНЭЭ, а значения доходов зависят от стоимости квот на выбросы $CO_2$ и тарифов на электроэнергию, для расчетов были приняты параметры и значения, представленные в табл.4.

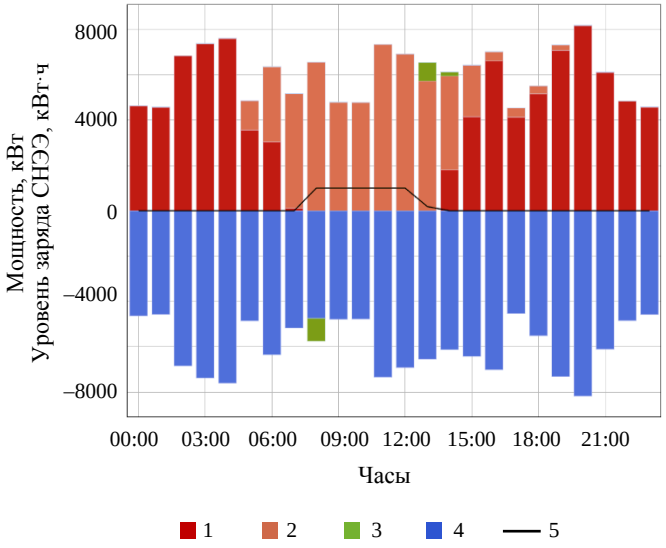



Рис.6. Суточный профиль работы гибридной системы электроснабжения с ФЭС установленной мощностью 9 МВт и СНЭЭ номинальной энергоемкостью 1 МВт·ч
1 – потребление из сети; 2 – солнечная генерация; 3 – СНЭЭ; 4 – нагрузка; 5 – уровень заряда СНЭЭ

*Таблица 3*

**Сравнение вариантов внедрения ВИЭ для Ростовской обл.**

| Критерий | ФЭС 8 МВт | ВЭС 0,8 МВт | ФЭС 9 МВт + + СНЭЭ 1 МВт·ч | ФЭС 8 МВт + + ВЭС 0,8 МВт |
|---|---|---|---|---|
| Производство электроэнергии, ГВт·ч | 11,82 | 2,42 | 13,32 | 14,18 |
| Доля ВИЭ в потреблении, % | 18,84 | 3,35 | 21,71 | 23,47 |
| NPC, млн руб. | 639,56 | 187,48 | 790,52 | 827,04 |
| NPV за 20 лет, млн руб. | –14,35 | –61,21 | –85,69 | –78,8 |
| LCOE, руб./кВт·ч/дол./кВт·ч | 5,11/0,066 | 7,32/0,093 | 5,60/0,071 | 5,51/0,07 |
| Выбросы $CO_2$, кт | 22,97 | 26,41 | 22,46 | 22,11 |
| Снижение выбросов $CO_2$, кт | 4,33 | 0,89 | 4,88 | 5,19 |
| Создание дополнительных рабочих мест (за время жизни проекта) | 9,77 | 2,00 | 11,01 | 11,72 |

[9] Renewable Power Generation Costs in 2021. URL: https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021 (дата обращения 01.04.2023).



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

*Таблица 4*

**Исследуемые параметры в анализе чувствительности инвестиционного проекта**

| Параметр | Значение | Исследуемый эффект |
|---|---|---|
| Соотношение удельной стоимости ФЭС, о.е. | 0,3-1,3 | NPC, LCOE |
| Соотношение удельной стоимости СНЭЭ, о.е. | 0,3-1,3 | NPC, LCOE |
| Тарифы на электрическую энергию и мощность, о.е. | 1-5 | NPV, DPP |
| Стоимость квот на выброс $CO_2$, дол./т/руб./т | 0-100/0-7732 | NPV, DPP |

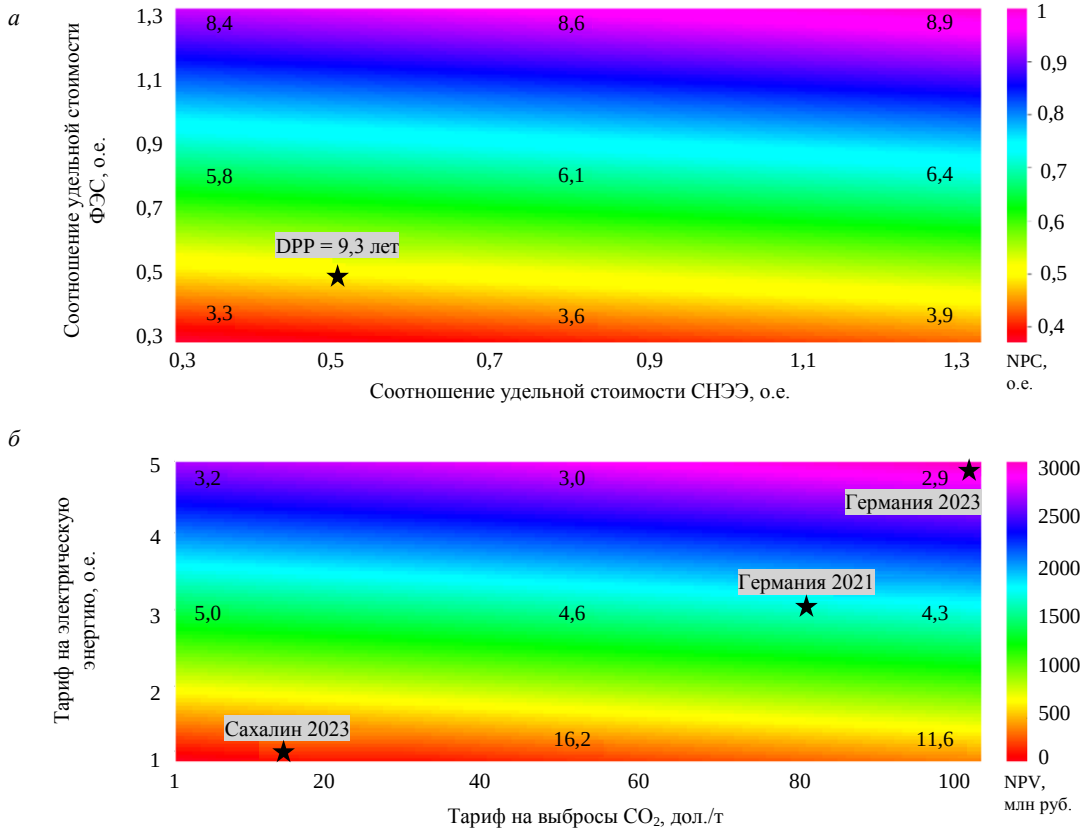



Рис.7. Результаты анализа чувствительности инвестиционного проекта: *а* – влияние удельной стоимости ФЭС и СНЭЭ на NPC и LCOE (значения LCOE указаны поверх диаграммы); *б* – влияние стоимости квот на выбросы $CO_2$ (NPC – const) и тарифов на электрическую энергию и мощность на NPV и DPP (значения DPP указаны поверх диаграммы)

Согласно расчетам, удельная стоимость ВИЭ и СНЭЭ значительно снизилась за последние 10 лет. На рис.7, *а* показан эффект изменения капитальных затрат и LCOE по отношению к текущим условиям.

Данные рис.7, *а* показывают, что значения LCOE и NPC могут быть снижены до 50 % в случае, если удельные стоимости ФЭС и СНЭЭ снизятся на 70 %. Отметим, что в РФ удельная стоимость генерации на ВИЭ в 2-4 раза выше, чем в среднем по миру, что создает значительные барьеры для реализации подобных проектов. Однако даже двухкратное снижение цен позволит снизить срок окупаемости только до 9 лет.

Влияние стоимости электрической энергии и стоимости квот на выбросы продемонстрировано на рис.7, *б*.

Из рис.7, *б* видно, что при повышении стоимости квот на выбросы до европейского уровня (80-100 дол./т $CO_2$/6186-7732 руб./т $CO_2$) уровень инвестиционной привлекательности проекта (DPP) остается недостаточным (≈11 лет). В случае установления стоимости квот на выбросы $CO_2$ равными значениям в Сахалинском эксперименте (1000 руб. ≈ 12,8 дол./т $CO_2$) по ограничению


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2023. Т. 261. С. 455-469
© Ф.С.Непша, К.А.Варнавский, В.А.Воронин, И.С.Заславский, А.С.Ливен, 2023

выбросов парниковых газов[10] срок окупаемости снижается только до 18 лет, что также остается неприемлемым. Отметим, что наибольшее влияние на окупаемость таких проектов оказывают тарифы на электрическую энергию и мощность. При текущем уровне тарифов проект не окупается. При тарифах на электроэнергию на уровне цен для индустриальных потребителей в Германии в 2021 г.[11] (0,21 дол./кВт·ч/16,24 руб./кВт·ч) срок окупаемости снижается до 4,5 лет. При текущем уровне цен на электроэнергию (0,4 дол./кВт/30,93 руб./кВт в 2023 г.) в Германии условия становятся еще более благоприятными, что способствует ускорению развития возобновляемой энергетики. В России на данный момент такие условия не созданы, а программа по договору о предоставлении мощности ВИЭ не рассчитана на поддержку индустриальных потребителей. Таким образом, даже в условиях создания рынка квот на выбросы $CO_2$ и установлении цен на уровне Сахалинского эксперимента возобновляемая энергетика на предприятиях МСК в России остается малопривлекательной и требует дополнительной поддержки.

**Заключение.** Мировые цели по достижению углеродной нейтральности создают новые вызовы перед российскими предприятиями МСК. При этом возникают дополнительные проблемы, повышающие социальную напряженность, в частности сокращение рабочих мест, занятых на угледобывающих предприятиях, и, как следствие, активная депопуляция и снижение уровня жизни моногородов. Одним из вариантов решения вышеуказанных проблем является внедрение ВИЭ. С целью оценки потенциала такого подхода, авторами выполнен анализ потенциала ВИЭ девяти угледобывающих регионов России и для дальнейшей проработки выбрана Ростовская обл. Для оценки перспектив внедрения ВИЭ была использована авторская программа для ЭВМ, позволяющая моделировать электроэнергетические балансы при внедрении генерации на ВИЭ. В дальнейших исследованиях планируется произвести технико-экономическую оценку создания водородного кластера на базе инфраструктуры угольной шахты.

Представленное исследование имеет значение с точки зрения климатической повестки и достижения углеродной нейтральности в РФ к 2060 г. Оно показывает, что в условиях российского рынка электрической энергии и мощности, даже в случае создания рынка квот на выбросы $CO_2$, потребуется дополнительное финансирование проектов по внедрению ВИЭ на предприятиях МСК для обеспечения их окупаемости. Таким образом, по мнению авторов, целесообразно принять к рассмотрению меры по государственной поддержке декарбонизации предприятий МСК с целью стимулирования проектов по их «озеленению».

Эффективность внедрения ВИЭ зависит также от суточного профиля электрической нагрузки. При несовпадении пиков электропотребления и генерации (при наличии ограничений на выдачу мощности в сеть) во избежание ограничения генерируемой мощности следует использовать СНЭЭ для выравнивания графика генерации ВИЭ, что увеличивает инвестиции в гибридный энергетический комплекс и срок его окупаемости. В рассмотренном варианте внедрения гибридного энергетического комплекса на предприятии с круглосуточным режимом работы потенциал солнечной генерации используется максимально, так как в часы пиковой солнечной активности не наблюдается снижения потребляемой мощности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Фатерина А.А.* Способы обеспечения экономической и энергетической безопасности при декарбонизации российской экономики // Государственное управление. Электронный вестник. 2022. Вып. 95. С. 41-52. DOI: 10.24412/2070-1381-2022-95-41-52

2. *Плакиткина Л.С., Плакиткин Ю.А., Дьяченко К.И.* Декарбонизация экономики как фактор воздействия на развитие угольной промышленности мира и России // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 8. С. 902-912. DOI: 10.32339/0135-5910-2021-8-902-912

3. *Зонова О.В., Шевелева О.Б., Слесаренко Е.В.* Тренды развития угольной отрасли в условиях внешних шоков // Уголь. 2023. № 2. С. 26-30. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-2-26-30

[10] Федеральный закон от 06.03.2022 № 34-ФЗ «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации».

[11] Industrial electricity prices including tax Germany 1998-2022. URL: https://www.statista.com/statistics/1050448/industrial-electricity-prices-including-tax-germany/ (дата обращения 02.04.2023).


Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

4. *Nepsha F., Belyaevsky R., Efremenko V., Varnavskiy K.* Modern Problems of Increasing Coal Mines Power Supply Efficiency // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 105. № 03026. DOI: 10.1051/e3sconf/201910503026

5. *Varnavskiy K.A., Nepsha F.S., Kostomarov R.V., Qingguang Chen.* Business Diversification of Coal Mining Enterprises Based on the Development of Coal Mine Methane Utilization Infrastructure // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), 11-13 November 2022, Yekaterinburg, Russian Federation. IEEE, 2022. С. 2060-2063. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016919

6. *Smirnova A., Varnavskiy K., Nepsha F. et al.* The Development of Coal Mine Methane Utilization Infrastructure within the Framework of the Concept «Coal-Energy-Information» // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 23. № 8948. DOI: 10.3390/en15238948

7. *Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А. и др.* Эффективность распределенной энергетики в условиях минерально-сырьевого комплекса // Промышленная энергетика. 2019. № 5. С. 8-16.

8. *Igogo T., Awuah-Offei K., Newman A. et al.* Integrating renewable energy into mining operations: Opportunities, challenges, and enabling approaches // Applied Energy. 2021. Vol. 300. № 117375. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117375

9. *Ampah J.D., Chao Jin, Agyekum E.B. et al.* Performance analysis and socio-enviro-economic feasibility study of a new hybrid energy system-based decarbonization approach for coal mine sites // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 854. № 158820. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158820

10. *Непша Ф.С., Воронин В.А., Ливен А.С., Корнеев А.С.* Оценка целесообразности применения когенерационных установок на угольных шахтах Кузбасса // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 141-150. DOI: 10.31897/PMI.2023.2

11. *Schulz J., Scharmer V.M., Zaeh M.F.* Energy self-sufficient manufacturing systems – integration of renewable and decentralized energy generation systems // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 43. P. 40-47. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.105

12. *Beier J., Thiede S., Herrmann C.* Energy flexibility of manufacturing systems for variable renewable energy supply integration: Real-time control method and simulation // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 141. P. 648-661. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.09.040

13. *Лебедева М.А., Идиятуллина Э.Ф., Чухлатый М.С., Набоков А.В.* Целесообразность применения возобновляемых источников энергии на промышленных предприятиях // Инженерный вестник Дона. 2019. № 9. С. 1-9.

14. *Islam M.M., Zeyi Sun.* Onsite generation system sizing for manufacturing plant considering renewable sources towards sustainability // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2019. Vol. 32. P. 1-18. DOI: 10.1016/j.seta.2019.01.004

15. *Jinze Li, Pei Liu, Zheng Li.* Optimal design of a hybrid renewable energy system with grid connection and comparison of techno-economic performances with an off-grid system: A case study of West China // Computers & Chemical Engineering. 2022. Vol. 159. № 107657. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2022.107657

16. *Абрамович Б.Н., Бельский А.А.* Выбор параметров ветродизельной установки для энергообеспечения минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. 2012. Т. 195. С. 227-230.

17. *Богданов И.А., Вериков А.А., Касьянова А.Н., Моренов В.А.* Повышение энергоэффективности электротехнических комплексов когенерационных установок для электроснабжения объектов нефтегазовых предприятий // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 12-5 (66). С. 59-63. DOI: 10.23670/IRJ.2017.66.144

18. *Renbo Gao, Fei Wu, Quanle Zou, Jie Chen.* Optimal dispatching of wind-PV-mine pumped storage power station: A case study in Lingxin Coal Mine in Ningxia Province, China // Energy. 2022. Vol. 243. № 123061. DOI: 10.1016/j.energy.2021.123061

19. *Menéndez J., Loredo J., Galdo M., Fernández-Oro J.M.* Energy storage in underground coal mines in NW Spain: Assessment of an underground lower water reservoir and preliminary energy balance // Renewable Energy. 2019. Vol. 134. P. 1381-1391. DOI: 10.1016/j.renene.2018.09.042

20. *Menéndez J., Ordónez A., Fernández-Oro J.M. et al.* Feasibility analysis of using mine water from abandoned coal mines in Spain for heating and cooling of buildings // Renewable Energy. 2020. Vol. 146. P. 1166-1176. DOI: 10.1016/j.renene.2019.07.054

21. *Yao Tao, Xu Luo, Jianli Zhou et al.* Site selection for underground pumped storage plant using abandoned coal mine through a hybrid multi-criteria decision-making framework under the fuzzy environment: A case in China // Journal of Energy Storage. 2022. Vol. 56. Part A. № 105957. DOI: 10.1016/j.est.2022.105957

22. *Pujades E., Jurado A., Orban P., Dassargues A.* Parametric assessment of hydrochemical changes associated to underground pumped hydropower storage // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 659. P. 599-611. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.103

23. *Strazzabosco A., Gruenhagen J.H., Cox S.* A review of renewable energy practices in the Australian mining industry // Renewable Energy. 2022. Vol. 187. P. 135-143. DOI: 10.1016/j.renene.2022.01.021

24. *Maregedze L., Chingosho H., Madiye L.* Use and cost optimization for underground mines electrical energy: A case of a mine in Zvishavane // Energy. 2022. Vol. 247. № 123374. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123374

25. *Hejuan Hu, Xiaoyan Sun, Bo Zeng et al.* Enhanced evolutionary multi-objective optimization-based dispatch of coal mine integrated energy system with flexible load // Applied Energy. 2022. Vol. 307. № 118130. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.118130

26. *Hongxu Huang, Rui Liang, Chaoxian Lv et al.* Two-stage robust stochastic scheduling for energy recovery in coal mine integrated energy system // Applied Energy. 2021. Vol. 290. № 116759. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116759

27. *Qin C., Loth E.* Isothermal compressed wind energy storage using abandoned oil/gas wells or coal mines // Applied Energy. 2021. Vol. 292. № 116867. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116867

28. *Limanskiy A.V., Vasilyeva M.A.* Using of low-grade heat mine water as a renewable source of energy in coal-mining regions // Ecological Engineering. 2016. Vol. 91. P. 41-43. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.02.008

29. *Menéndez J., Ordóñez A., Álvarez R., Loredo J.* Energy from closed mines: Underground energy storage and geothermal applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 108. P. 498-512. DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.007

30. *Ting Bao, Meldrum J., Green C. et al.* Geothermal energy recovery from deep flooded copper mines for heating // Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 183. P. 604-616. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.01.007

31. *Burnside N.M., Banks D., Boyce A.J., Athresh A.* Hydrochemistry and stable isotopes as tools for understanding the sustainability of minewater geothermal energy production from a 'standing column' heat pump system: Markham Colliery, Bolsover, Derbyshire, UK // International Journal of Coal Geology. 2016. Vol. 165. P. 223-230. DOI: 10.1016/j.coal.2016.08.021



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

32. *Шклярский Я.Э., Батуева Д.Е.* Разработка алгоритма выбора режимов работы комплекса электроснабжения с ветро-дизельной электростанцией // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 115-126. DOI: 10.31897/PMI.2022.7

33. *Sinha S., Chandel S.S.* Review of software tools for hybrid renewable energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 32. P. 192-205. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.035

34. *Thirunavukkarasu M., Sawle Y.* An Examination of the Techno-Economic Viability of Hybrid Grid-Integrated and Stand-Alone Generation Systems for an Indian Tea Plant // Frontiers in Energy Research. 2022. Vol. 10. № 806870. DOI: 10.3389/fenrg.2022.806870

35. *Chauhan A., Saini R.P.* Techno-economic feasibility study on Integrated Renewable Energy System for an isolated community of India // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 59. P. 388-405. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.290

36. *Bagherian M.A., Mehranzamir K., Pour A.B. et al.* Classification and Analysis of Optimization Techniques for Integrated Energy Systems Utilizing Renewable Energy Sources: A Review for CHP and CCHP Systems // Processes. 2021. Vol. 9. Iss. 2. № 339. DOI: 10.3390/pr9020339

***Авторы*: Ф.С.Непша,** *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент, nepshafs@kuzstu.ru, https://orcid.org/0000-0002-7468-2548* (*Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия*; *РГУ нефти и газа* (*НИУ*) *имени И.М.Губкина, Москва, Россия*), **К.А.Варнавский,** *д-р философии, заведующий лабораторией, https://orcid.org/0000-0001-7116-8765* (*Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия*), **В.А.Воронин,** *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-7242-9100* (*Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия*), **И.С.Заславский,** *техник, https://orcid.org/0000-0001-9226-6022* (*Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия*), **А.С.Ливен,** *техник, https://orcid.org/0000-0001-9138-6858* (*Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия*).

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*