

О.Н. Шарнопольская /к.э.н./, К.Н. Маренич /д.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ В УСЛОВИЯХ ДОНБАССА

На основании комплексного анализа специфики применения солнечных и ветровых электрогенерирующих установок, климатических условий Донбасса и в сопоставлении с необходимым уровнем энергопотребления, а также с учётом наличия в регионе ископаемых энергоносителей доказано, что мероприятия по декарбонизации электроэнергетической отрасли Донецкой Народной Республики не имеют перспективы достичь приемлемого уровня эффективности.

Ключевые слова: Донбасс, электроэнергетика, тепловая электростанция, солнечный модуль, ветровая электростанция, климатические условия, декарбонизация, факторы, обоснования, анализ целесообразности.

Постановка проблемы

Отличаясь уникальными по видам и объёмам запасов, пригодными к промышленному освоению залежами полезных ископаемых и занимая выгодное в контексте решения вопросов логистики географическое положение, Донбасс прочно занял место одного из важнейших промышленных регионов мирового уровня. При этом исторически сложилось так, что промышленность Донбасса представлена, в основном, энергоёмкими отраслями: угольной, металлургической, химической, машиностроительной, что, в свою очередь, предопределило необходимость концентрации на территории региона объектов электрогенерации и электроснабжения высокой, сопоставимой с потребностями отраслей и инфраструктуры мощности.

Следствием развития промышленности в Донбассе в период индустриализации явилось создание и эксплуатация комплекса тепловых электростанций (ТЭС), адаптированных под применение местных углей марок «А» (антрациты); «Г» (газовые) и ряда других, близких по теплотворной способности. При этом отсутствие достаточных по энергетическим параметрам водных ресурсов предопределило невозможность возведения в регионе гидроэлектростанций, а высокой концентрацией на относительно малой территории населённых пунктов и населения, в целом, предопределена неприемлемость использования в Донбассе объектов атомной электроэнергетики.

Современный уровень развития электроэнергетики предполагает применение наряду с традиционными техническими средствами электрогене-

рации, относящихся к т.н. «зелёной» энергетике, действующих на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – энергия ветра, энергия Солнца, что не сопровождается загрязнением атмосферы продуктами горения угля, мазута, газа. В числе актуальных следует рассматривать тенденцию развития объёмов применения электрогенерирующих средств ВИЭ до уровня основных средств электрогенерации с вытеснением из этого статуса традиционных электрогенерирующих объектов, функционирующих на угольном, либо газовом топливе.

Активизация этого процесса обусловлена обоснованиями целесообразности сокращения выбросов углекислого газа (CO₂) в атмосферу, развитых инициативными приверженцами «зелёной энергетики» в мировом информационном пространстве до уровня предупреждения о надвигающемся «апокалипсисе». Практическая реализация идеи вытеснения традиционных средств электрогенерации объектами, основанными на использовании ВИЭ, наиболее ярко выражена в структуре систем электроснабжения стран Евросоюза. Однако опыт эксплуатации в условиях природных катаклизмов (пример – зимний период 2020-2021 гг.) выявил, по меньшей мере, функциональную недостаточность данных электрогенерирующих объектов. Вместе с тем, навязчивое продвижение идеи повсеместного использования электрогенерирующих средств с ВИЭ требует детального анализа, научного обоснования относительно соответствия критериям целесообразности, возможности, рентабельности, в частности, применительно к обеспечению достаточными энергетически-

ми ресурсами предприятий Донбасса. Отмеченные технико-экономические факторы могут быть рассмотрены и проанализированы применительно к промышленному комплексу Донецкой Народной Республики.

Анализ последних исследований и публикаций

Исследования и разработки в области средств электрогенерации на основе ВИЭ, в основном, касаются специфики конструкции и эксплуатации, а также технических характеристик их функциональных компонентов: ветрогенераторов, солнечных батарей [1,2]. Это является достаточной базой для проектирования и технической реализации комплектных силовых объектов электрогенерации, адаптированных к мощностным показателям потенциальных электропотребителей при условии стабильности климатических факторов в местах эксплуатации. Отсутствие фактора загрязнения окружающей среды является безусловным преимуществом электрогенераторов с ВИЭ по сравнению с тепловыми электроэнергетическими установками. Однако наряду с преимуществами в отношении применения последних необходимо учитывать и проблемные вопросы, а также совокупность сопутствующих экономических издержек, влияние возмущающих факторов, обусловленных возможной нестабильностью климатических условий эксплуатации (в пределах конкретного диапазона параметров) в зависимости от региона размещения электрогенерирующей установки с ВИЭ. В исследовании [3] доказана целесообразность применения алгоритмически простого комбинаторного подхода при: анализе перспектив развития региональной возобновляемой энергетики; разработке и использовании системы существенных показателей, определяющих степень эффективности сравниваемых вариантов технических средств силовой электрогенерации. Такой подход вполне приемлем и в настоящем исследовании.

Для такого промышленного региона, каким является Донбасс, актуальна оценка целесообразности замены тепловых электростанций, работающих на угольном топливе силовыми электроэнергетическими установками с ВИЭ в условиях специфики компактного промышленно насыщенного и густозаселённого региона, обладающего достаточным количеством ископаемого источника энергии (угля для ТЭС), развитыми производствами и технологиями по его добыче и доставке.

Решение данной задачи предполагает установление закономерностей, причинно-следст-

венных связей, которые могут быть распространены на любой промышленно насыщенный компактный регион. Конкретное рассмотрение данной проблематики представляется корректным на примере анализа возможного применения силовых электрогенерирующих средств с ВИЭ в условиях Донецкой Народной Республики, где явно выражены упомянутые выше возмущающие и сопутствующие факторы.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящего исследования является разработка и апробация метода анализа факторов целесообразности применения средств электрогенерации на основе возобновляемых источников энергии в условиях промышленного региона, обладающего достаточными ископаемыми ресурсами для осуществления тепловой электрогенерации в объёмах, сопоставимых с потребностями потребителей.

Основной материал исследования

В основе исследования может лежать допущение о выводе из эксплуатации на территории промышленного региона (Донецкой Народной Республики) обеих её тепловых Старобешевской и Зуевской электростанций [4,5], работающих на угле местной добычи и компенсации (100 %) их выведенных мощностей (табл. 1) вводимыми мощностями электростанций, функционирующих на основе применения: солнечных батарей, ветрогенераторов. Рассмотрим каждый из вариантов реализации инициативы декарбонизации энергетики Донбасса в контексте выявления и оценки проблемных вопросов.

Сооружение солнечных электростанций (СЭС) на основе использования солнечных модулей обуславливает необходимость отчуждения значительной площади территории. Так, в расчёты следует принять, что в эксплуатации будет находиться самый распространённый солнечный модуль мощностью $P_{см}=350$ Вт, состоящий из 72 элементов и имеющий размеры 1960x990 мм [1]. Угол α наклона модуля к поверхности земли варьируется в пределах [6]:

$$\alpha = \alpha_{ш} \pm 15^\circ, \quad (1)$$

где $\alpha_{ш}$ – координата географического расположения региона (для г. Донецка – 48° северной широты); знак «+» – зимний период; знак «-» – летний период.

Исходя из (1), площадь под установку одного солнечного модуля должна быть рассчитана применительно к его летнему размещению, т.е. протяженность l_1 площадки вычисляется из со-

отношения $l_1 = h_1 \cos \alpha$, где h_1 – высота солнечного модуля (1960 мм). Тогда для широты Донецка $l_1 = 1960 \cdot \cos 33^\circ = 1960 \cdot 0,8387 = 1644$ мм, а минимальная площадь под установку солнечного модуля будет равна $1644 \times 990 = 1,63$ м².

Для компенсации суммарной мощности двух тепловых электростанций солнечными модулями количество последних должно составлять:

$$n_{\min} = \frac{P_{\text{факт}}}{P_{\text{см}}} = \frac{(1420 + 1270) \cdot 10^6}{350} = 7,686 \cdot 10^6 \text{ шт.} \quad (2)$$

Это потребует отчуждения площади в размере: $1,63 \times 7,686 \cdot 10^6 = 12,528 \cdot 10^6$ м² = 12,528 км². Следует отметить, что это минимальная площадь под размещение солнечных модулей, поскольку, в данном случае необходимо учитывать деградацию солнечных элементов на 10 % за каждые 10 лет [1]. Поэтому, из расчёта функционирования СЭС минимум, в течение 20 лет количество модулей должно составлять 1,2 от расчётного, что потребует отчуждения 15,03 км² территории региона. Полученные результаты являются минимальными, т.к. не учитывают неработоспособность СЭС в ночное время суток, что предполагает, как минимум, удвоение числа солнечных элементов.

В предположении, что речь идёт о площади сельскохозяйственного назначения, может быть произведен расчёт материальных потерь, обусловленных недополучением одного из видов сельскохозяйственной продукции в расчёте на год (пшеница, кукуруза, подсолнечник и т.п.). Кроме этого, размещение на значительной территории солнечных модулей обусловит изменение естественного температурного режима по-

верхности земли, что косвенно может оказывать влияние на климат региона.

В действительности, речь может идти о значительно большем отчуждении территории под СЭС. Во-первых, могут использоваться солнечные модули тех же размеров, но меньшей мощности, что приведёт к увеличению требуемого их количества. Во-вторых, специфика эксплуатации солнечного модуля предполагает автоматическую коррекцию его параметров исходя из критерия поддержания максимальной выходной мощности с адаптацией к текущей интенсивности солнечного освещения, что поясняется рис. 1 и реализуется контроллерами заряда с технологией «Maximum Power Point Tracking» (MPPT) [1]. Отсюда должны быть предусмотрены места для расположения контроллеров MPPT, а также территория для работы персонала. К значительным материальным издержкам следует также отнести необходимость применения значительного количества аккумуляторов, преобразователей постоянного тока в переменный (DC/AC), силовых трансформаторов, т.к. речь идёт о преобразовании напряжения 715 В постоянного тока (с выхода солнечных модулей) в напряжение 110 000 В переменного тока, согласующегося с параметрами линий электропередач и районных электроподстанций региона.

Отдельного рассмотрения заслуживают вопросы эффективности использования солнечных модулей на широте г. Донецка. Табличные параметры (в частности, мощность) каждого солнечного модуля представлены применительно к постоянно воздействующей солнечной радиации 1000 Вт/м² при температуре окружающей среды 25 С на широте 45° при отсутствии запылённости поверхностей солнечных модулей.

Табл. 1. Технические параметры тепловых электростанций Донецкой Народной Республики [1,2]

№ п/п	Наименование	Старобешевская ТЭС	Зуевская ТЭС
1	Топливо основное	Уголь марки «А»; Угольный шлам «АШ»	Угли газовых марок
2	Топливо резервное	Газ, мазут	
3	Энергоблоки	3×100 МВт; 1×125 МВт; 8×195 МВт; 1×200 МВт	1×275 МВт; 1×320 МВт; 2×325 МВт
4	Турбины	К-100-900 – 3 шт. К-200-130 – 10 шт.	К-300-240 – 4 шт.
5	Генераторы	ТВ2-100 – 3 шт. ТГВ2-200 – 10 шт.	ТГВ-300-2У – 4 шт.
6	Фактическая электрическая мощность, $P_{\text{факт}}$ (МВт)	1420	1270

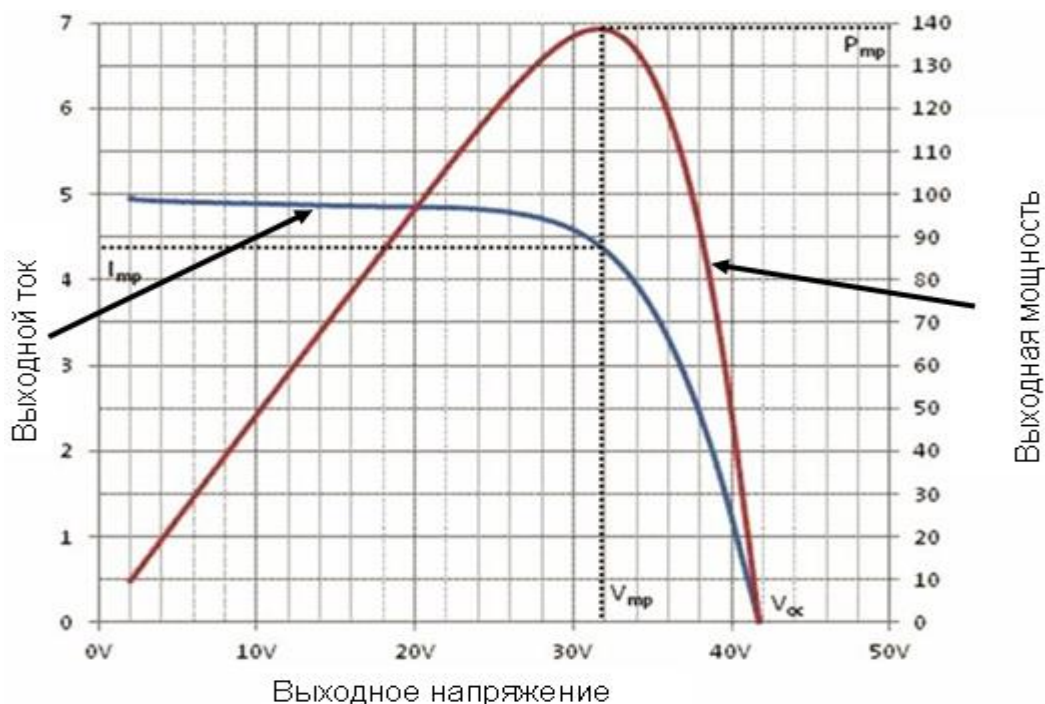


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика солнечного модуля из 72 элементов на 180 Вт при солнечной радиации 1000 Вт/м² при температуре окружающей среды 25 С на широте 45°

Следует учесть, что для степных условий Донбасса фактор запылённости солнечных модулей не может быть исключён. Исследованиями [7] установлено, что запылённость поверхностей солнечных модулей снижает их электрическую мощность, в среднем, на 35 %. При лёгкой облачности вырабатываемая электрическая мощность составляет 60÷80 % от максимальной, в пасмурную погоду – 20÷30 % от максимальной, в условиях снежного покрова поверхностей солнечного модуля его функционирование невозможно.

Из результатов наблюдений за погодными условиями в Донецке [8], следует, что в 2020 г. на этой территории было 42,27 % солнечных дней, 25,41 % облачных дней, и 32,32 % пасмурных дней. При этом пик пасмурных дней приходится на ноябрь – март месяцы (5 месяцев в году). Кроме этого, 2 месяца в году (апрель и май) отличались относительно большим количеством облачных и пасмурных дней (табл. 2).

Если пренебречь факторами запылённости и снежного покрова, то, только с учётом изменения воздействия солнечной радиации, обусловленный облачностью фактический показатель мощности СЭС, в среднем, будет составлять порядка 60 % от номинального, при этом на протяжении 5-7 месяцев этот показатель будет существенно снижен в сравнении с требуемым, что характеризуется совокупной мощностью действующих угольных ТЭС.

Уже исходя из этого, даже не учитывая материальные издержки на приобретение оборудова-

ния СЭС, демонтаж и утилизацию оборудования ТЭС и материальную компенсацию трудоёмкости обслуживания СЭС, можно сделать вывод о нецелесообразности применения солнечных электростанций в качестве основных электрогенерирующих объектов в условиях Донбасса.

Кроме этого, рассматривая возможности декарбонизации, в частности, электроэнергетики на основе широкого распространения СЭС как альтернативных электрогенерирующих объектов, следует отметить, что само производство солнечных модулей и их компонентов сопряжено с рядом существенных негативных факторов, в т.ч. воздействия на окружающую среду [9]:

- технология добычи кварца (диоксида кремния) – превалирует подземный шахтный способ, есть риск заболевания персонала силикозом лёгких;
- печная переработка кварца в металлургический кремний отличается высокой энергоёмкостью и сопряжена со значительными выбросами в атмосферу диоксида углерода (CO₂) и диоксида серы (SO₂);
- переработка металлургического кремния в поликремний сопряжена с получением высокотоксичного вещества – кремниевого тетрахлорида, превышающего в 4 раза объём производимого поликремния. Это крайне опасный фактор загрязнения окружающей среды;
- очистка кремниевых пластин крайне агрессивной фтористоводородной кислотой несёт опасность загрязнения окружающей среды.

Табл. 2. Данные о количестве солнечных (С), облачных (О) и пасмурных (П) дней 2020 г. в Донецке

Месяц	С	О	П	Месяц	С	О	П	Месяц	С	О	П	Месяц	С	О	П
январь	2	5	24	апрель	12	8	9	июль	20	9	2	октябрь	17	8	6
февраль	5	5	18	май	15	11	5	август	24	6	1	ноябрь	10	7	12
март	7	9	15	июнь	17	10	2	сентябрь	20	7	3	декабрь	4	7	20

Кроме этого, технологический процесс сопровождается высоким уровнем водопотребления.

Альтернативным вариантом в контексте декарбонизации электроэнергетики промышленного региона можно считать возведение и эксплуатацию ветровых электростанций (ВЭС). Мощность ветроэлектростанции определяется соотношением:

$$P_{ВЭГ} = 0,6 (\pi r^2) v^3, \quad (3)$$

где r – расстояние от центра вала генератора до конца лопасти (м); v скорость ветра (м/с).

В качестве примера может быть рассмотрена ВЭС на основе наиболее распространённого в промышленности ветроэлектростанции Enercon E-126 [1] с параметрами:

- мощность 7,58 МВт;
- ометаемая площадь 12668 м²;
- частота вращения лопастей 5÷11,7 об/мин;
- скорость ветра: минимальная – 3 м/с; номинальная – 9 м/с; критическая (штормовое ограничение) – 34 м/с;
- габариты: высота – 198 м, размах лопастей – 128 м;
- стоимостной показатель 2020 г. – 11 млн. €.

Таким образом, компенсация суммарной мощности действующих в Донецкой Народной Республике тепловых электростанций может быть достигнута созданием ВЭС из $n_{ВЭГ}$ ветровых электростанций

$$n_{ВЭГ} = \frac{P_{факт}}{P_{ВЭГ}} = \frac{(1420+1270) \cdot 10^6}{7,58 \cdot 10^6} \approx 168 \text{ шт.}, \quad (4)$$

что эквивалентно стоимостным затратам только по статье «ветроэлектростанции» – 1848 млн. €. В дальнейшем эта сумма должна быть увеличена в соответствии с действующими нормативами и коэффициентами, относящимися к транспортным расходами, расходам на монтаж – демонтаж и т.п.

Из положительных аспектов следует отметить, что эксплуатация ветровых электростанций не предполагает отчуждения значительных площадей территории. Здесь может сохраняться экономическая деятельность человека, в частности, в области ведения сельскохозяйственных работ. Эффективная работа ВЭС определяется наличием и устойчивостью ветра в рабочем диапазоне скоростей. Статистика наблюдений за направлением и скоростью ветра в Донецкой Народной Республике свидетельствует о непостоянстве направления ветра и его скорости, находящейся на пределе рабочих характеристик ветроэлектростанции (табл. 3, табл. 4) [10,11].

Исходя из данных табл. 4, можно сделать вывод, что в условиях климата Донецкой Народной Республики применение ветроэлектростанций будет находиться на пределе устойчивости их работы. При этом в соответствии с (3) и на основании технических характеристик ВЭГ типа Enercon E-126 при таком уровне скорости ветра его мощность будет ниже номинальной в 27 раз.

Табл. 3. Распределение ветра в Донецке по направлениям в течение года

Направление	Север	Северо-восток	Восток	Юго-восток	Юг	Юго-запад	Запад	Северо-запад
% в течение года	11,3	9,7	18,7	14,1	8,9	9,6	16,9	10,9

Табл. 2. Данные о средней скорости ветра (м/с) в 2020 г. в Донецке, Новоазовске

Месяц	Донецк	Новоазовск	Месяц	Донецк	Новоазовск
январь	3,2	4,3	июль	2,9	4,1
февраль	3,8	5,3	август	2,6	3,6
март	3,9	5,1	сентябрь	3,7	5,2
апрель	3,6	4,3	октябрь	3,7	5,0
май	3,2	4,5	ноябрь	3,2	4,5
июнь	2,9	3,9	декабрь	4,2	6,3

Компенсацию этой потери мощности можно осуществить только соответствующим увеличением ветроэлектрогенерирующих установок, что крайне затратно. В целом, высокая вероятность неустойчивости электрогенерации, обусловленная стабильно низкой скоростью ветров уже является фактором, препятствующим вытеснению традиционных тепловых электростанций ветроэлектростанциями на территории и в климатических условиях Донбасса, с учётом необходимости надёжного электроснабжения развитых в регионе энергоёмких отраслей.

Выводы

В результате анализа направлений по декарбонизации электроэнергетики в условиях промышленного комплекса и климатических условий Донбасса и, в частности, Донецкой Народной Республики обоснована неприемлемость и невозможность их реализации в промышленных масштабах на основе применения солнечных и ветровых электрогенерирующих установок. Рациональным следует признать сохранение электрогенерации на основе местного угольного топлива при возможности резервного использования – газового топлива с учетом более высоких издержек на его транспортировку по трубопроводам большой протяжённости в сравнении с транспортировкой угля железнодорожным транспортом в пределах малых расстояний.

Направлением дальнейшего исследования является анализ технических возможностей и экономических факторов процесса утилизации метана на основе применения когенерационных технологий и устройств в контексте развития дополнительного направления в области электроэнергетики Донбасса и позитивного воздействия на состояние окружающей среды.

Список литературы

1. Характеристики солнечных батарей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electrik.info/main/energy/1550-harakteristiki-solnechnyh-batarey.html>. – Загл с экрана.
2. Применение промышленных ветрогенераторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tcip.ru/blog/wind/primenenie-promyshlennyh-vetrogeneratorov.html>. – Загл с экрана.

3. S. Drobyazko Modeling of Prospects for the Development of Regional Renewable Energy / S. Drobyazko, S. Wijaya, P. Blecharz, S. Bogachov, M. Pinskaya // *Energies* 2021, 14, 2221. – 17 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://doi.org/10.3390/en14082221>. – Загл с экрана.
4. Старобешевская тепловая электростанция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/СТАРОБЕШЕВСКАЯ_ТЭС. – Загл с экрана.
5. Зуевская тепловая электростанция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/ЗУЕВСКАЯ_ТЭС. – Загл с экрана.
6. Зимние проблемы солнечных батарей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://altenergiya.ru/sun/zimnie-problemy-solnechnyx-batarej.html>. – Загл с экрана.
7. Влияние препятствий солнечным лучам на выработку энергии солнечными панелями [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/techorient.htm>. – Загл с экрана.
8. Сколько солнечных дней в Донецке (2020 г.). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://anyroad.ru/city/weather/sunnydays/%D0%B4%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D1%86%D0%BA,ua>. – Загл с экрана.
9. Производство и утилизация солнечных панелей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tcip.ru/blog/solar-panels/vredni-li-solnechnye-batarei.html>. – Загл с экрана.
10. Погода в Донецке по месяцам в 2020 году. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://world-weather.ru/pogoda/ukraine/donetsk/2020/>. – Загл с экрана.
11. Погода в Новоазовске по месяцам в 2020 году. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://world-weather.ru/pogoda/ukraine/novoazovsk/2020/>. – Загл с экрана.

O.N. Sharnopolskaya /Ph. D./, K.N. Marenich /Dr. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

ANALYSIS OF FACTORS OF EXPEDIENCY OF USING MEANS OF ELECTRIC GENERATION BASED ON RENEWABLE SOURCES IN THE CONDITIONS OF THE DONBASS

Background. Based on a comprehensive analysis of the specifics of the use of solar and wind power generating plants, the climatic conditions of Donbass and in comparison with the required level of energy consumption, as well as taking into account the presence of fossil energy carriers in the region, it

is proved that decarbonization measures of the electric power industry of the Donetsk People's Republic have no prospects of achieving an acceptable level of efficiency.

Materials and/or methods. *The initial materials for the analysis are data on the technical characteristics of Donbass thermal power plants, the climatic characteristics of the region, the design and application features of solar and wind power plants.*

Results. *The analysis of economic efficiency factors and comparison of the technical capabilities of solar and wind power plants with the conditions of their use in the Donbass in the context of solving the problem of decarbonization of the electric power industry, taking into account the peculiarities of the climate and the required level of energy consumption*

Conclusion. *As a result of the analysis of the directions for decarbonization of the electric power industry in the conditions of the industrial complex and climatic conditions of Donbass and, in particular, the Donetsk People's Republic, the unacceptability and impossibility of implementing this direction on an industrial scale based on the use of solar and wind electric power generating plants is justified. It is rational to recognize the preservation of electric generation based on local coal fuel with the possibility of reserve use - gas fuel, taking into account the higher costs of its transportation through long-distance mercury pipelines in comparison with the transportation of coal by rail within short distances.*

Keywords: *Donbass, electric power industry, thermal power plant, solar module, wind power plant, climatic conditions, decarbonization, factors, justifications, feasibility analysis.*

Сведения об авторах

О.Н. Шарнопольская

SPIN-код: 9461-5984

Телефон: +380 (71) 309-81-08

Эл. почта: o.sharnopolskaya@mail.ru

К.Н. Маренич

SPIN-код: 8632-8425

Author ID: 377905

ORCID iD: 0000-0002-6309-4986

Телефон: +380 (71) 301-98-61

Эл. почта: knm1@donntu.org

Статья поступила 15.04.2021 г.

© О.Н. Шарнопольская, К.Н. Маренич, 2021

Рецензент д.т.н., проф. И.А. Бершадский

