

МАЛАЯ ЭНЕРГЕТИКА В АРКТИКЕ: ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ И РИСКИ¹

Д.А. СОЛОВЬЁВ, (ОИВТ РАН)

В связи с растущим интересом к освоению территорий и ресурсов Российской Арктики, всё более актуальным становится вопрос о комплексном развитии энергетической инфраструктуры региона, обеспечивающей комфортные условия работы и проживания и минимизирующей антропогенное воздействие на окружающую среду.

Основу энергетики Арктического региона составляет завозимое из других регионов ископаемое топливо. Отсутствие развитой транспортной инфраструктуры и сложные климатические условия Арктики сильно осложняют организацию логистических процессов, поэтому возможность сообщения с регионом для доставки топлива весьма ограничена. Сложности транспортировки топлива влекут за собой высокие транспортные издержки, которые сказываются на конечной себестоимости вырабатываемой энергии. Для снижения таких издержек требуется радикально изменить подход к энергоснабжению региона². Наиболее перспективным с точки зрения снижения затрат на транспортировку топлива в арктические районы России, представляется локальное использование возобновляемой энергии ветра, солнца, воды и биомассы³.

Различные типы генерации, использующие возобновляемые источники энергии в Арктической зоне России, подвержены специфическим видам рисков, которые наряду с финансово-инвестиционными, ресурсными и операционными обусловлены климатическими особенностями региона и его удалённостью от центра. Отдельно стоит выделить фактор риска, связанный с происходящими сейчас глобальными климатическими изменениями.

Очевидно, что в арктическом регионе приоритетной задачей при сооружении объектов энергетики на основе возобновляемых источников энергии является разработка проектов строительства электростанций с использованием инновационных технических решений, обеспечивающих минимальные риски для окружающей среды и надёжную эксплуатацию в различных климатических условиях⁴.

С учётом удалённости населённых пунктов друг от друга, особое значение приобретает автономное энергоснабжение объектов навигации и связи с применением местных возобновляемых источников. Кроме того, для Арктического региона характерно значительное число потребителей, живущих и работающих вне населённых пунктов. В первую очередь к ним относятся коренные народы Севера, занятые оленеводством, а также туристы, геологи, рыбаки, охотники, военнослужащие. Наличие таких

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00640\17.

² Габдерахманова Т.С., Киселёва С.В., Попель О.С., Тарасенко А.Б. Некоторые аспекты развития возобновляемой энергетики в арктической зоне РФ // *Альтернативная энергетика и экология*. 2016. № 19–20. С. 41–53.

³ Моргунова М.О., Соловьёв Д.А. Энергоснабжение Российской Арктики: Углеводороды или ВИЭ? Москва: ООО “Системный консалтинг”, 2016. 14 с.

⁴ Нефёдова Л.В., Соловьёв А.А. Тенденции и риски использования возобновляемых источников энергии в сельских районах стран Африки // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2016. № 20 (5). С. 99–106.

потребителей делает весьма актуальной разработку лёгких и компактных накопителей энергии⁵.

Рассмотрим более подробно некоторые значимые факторы, по которым могут оцениваться основные риски, присутствующие энергосистемам возобновляемых источников энергии в условиях АЗРФ.

Так, например, фактор риска недополученной прибыли при осуществлении инвестиционного проекта в сфере возобновляемой энергетики (**инвестиционный риск**) возможно оптимизировать в случае перехода на сооружение установок комбинированного энергоснабжения небольшой мощности с использованием гибридных энергоустановок.

Ресурсные риски, связанные с пространственно-временными изменениями параметров генерации энергоустановок на возобновляемых источниках энергии, должны устраняться использованием достоверных знаний о потенциалах возобновляемых ресурсов, актуализированных применительно к конкретным территориям размещения объектов возобновляемой энергетики.

К ресурсным факторам риска можно отнести и процессы, обусловленные глобальными климатическими изменениями. Согласно опубликованному в марте 2017 г. данным Доклада об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 г.⁶ среднегодовая температура на всей территории России продолжала расти более чем в 2.5 раза быстрее глобальной, со скоростью 0.45 °C за 10 лет, и особенно быстро в полярной области, где скорость роста достигает 0.8 °C за 10 лет (Таймыр). На фоне потепления продолжался рост годовой суммы осадков. В целом для Арктического региона годовая сумма осадков в 2016 г. была выше нормы на 3.0%. Как ожидается, дальнейший рост числа осадков в Арктике приведёт к её заболачиванию. Этот эффект может проя-

виться сильнее всего в центральной и восточной части арктического побережья.

Практически синхронно идёт сокращение как общей площади арктических льдов, так и ледового покрытия сибирских морей (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское). Ледовый покров сибирских морей уменьшился до 450 тыс. км², в то время как в "тёплое время" середины XX века его величина составляла около 700–800 тыс. км².

Однако ещё более показательным свидетельством потерь ледового покрова является сокращение толщины льдов, в частности, площади паковых (многолетних) льдов. За последние годы "старые" льды сократились в несколько раз. Именно по их площади можно судить о многолетних изменениях зимнего ледового покрова.

Другим наглядным свидетельством потепления климата служит таяние многолетней, так называемой вечной, мерзлоты⁷. На значительной части криолитозоны России, занимающей более 60% территории страны (это самый большой массив мерзлоты в мире, находящийся под единой национальной юрисдикцией), за период с 1970-х до 1990-х гг. отчётливо выражена тенденция к повышению температуры верхних слоёв мёрзлых пород, связанная с потеплением атмосферы. Хотя климатические изменения в Европейской части России слабее, чем в Сибири, но изменения в состоянии мерзлоты здесь не менее существенны. За последние 20–30 лет температура толщи мерзлоты в Европейской части российской Арктики и Субарктики повысилась от +0.22 до +1.56 °C, и возросло число и толщина таликов (подземных талых участков). Данные наблюдений говорят также о прогрессирующем увеличении сезонно-талого слоя мерзлоты и величины просадки грунта за последние 10 лет в отдельных районах российской Арктики на 14–80% (Колымская низменность, Восточная Чукотка, Большеземельская тундра). Отмечен сдвиг

⁵Рогозин Д.О. Арктика – регион сотрудничества и развития // Транспортная стратегия – XXI век. 2016. № 33. С. 66.

⁶Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 г. – Новости и события – Пресс-центр – Росгидромет Москва: Росгидромет, 2017. 70 с.

⁷Кокорин А.О., Карелин Д.В., Стеценко А.В. Воздействие изменения климата на российскую Арктику: анализ и пути решения проблемы. Москва, 2008.

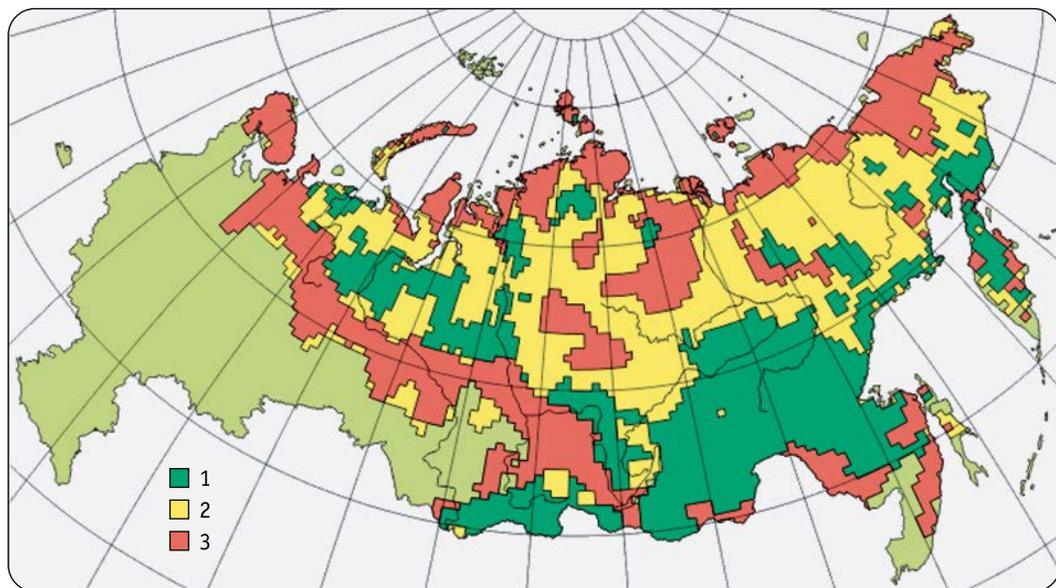


Рис. 1.
Карта рисков для зданий и сооружений
в зоне вечной мерзлоты: 1 – слабый,
2 – средний, 3 – высокий риск. Данные
Государственного гидрологического
института.

к северу области распространения мерзлоты в целом.

Возникает вопрос, – чем будут угрожать такие глобальные изменения для существующей сегодня арктической инфраструктуры и как это может сказаться на перспективах развития энергетического хозяйства региона? Прежде всего, это может привести к повышению риска возникновения опасных криогенных явлений, таких как солифлюкция⁸, термокарст⁹ и просадка грунта. Деградация мерзлоты представляет большую опасность для расположенных в районах Крайнего Севера зданий, дорог и других инженерных сооружений.

⁸ Солифлюкция (от лат. *solum* – почва, земля и *fluctio* – истечение – течение увлажнённых грунтовых масс по склонам, развивающееся в результате повторяющегося их промерзания – протаивания. <http://www.mining-enc.ru/s/soliflyukciya/>

⁹ Термокарст (от греч. *therme* – тепло и *karst* – вытаивание подземных льдов, сопровождающееся просадками поверхности Земли и появлением отрицательных форм рельефа и микрорельефа. <http://www.mining-enc.ru/t/termokarst>

Многие сооружения построены на свайных фундаментах, используют многолетнемёрзлый грунт в качестве оснований и рассчитаны на эксплуатацию в определённых температурных условиях. За последние 30 лет в Якутске из-за просадок мёрзлого грунта серьёзные повреждения получили более 300 зданий. В целом за последние годы число сооружений, получивших повреждения из-за неравномерных просадок фундаментов, увеличилось по сравнению с предшествующим десятилетием в Норильске на 42%, в Якутске – на 61%, в Амдерме на 90%¹⁰.

Прогнозы показывают, что таяние, вернее, разрушение многолетнемёрзлых пород идёт не с юга на север, а гораздо более сложным путём. В Государственном гидрологическом институте были проведены специальные исследования и построены карты риска (по индексу геокриологической опасности)¹¹. Во многих районах Арктики и, в частности, на Чукотке, риск для зданий и инфраструктуры в целом высокий, несмотря на относительно небольшое увеличение

¹⁰ Анисимов О.А., Лавров С.А. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК // Технологии ТЭК. 2004. № 3. С. 78–83.

¹¹ Anisimov O., Reneva S. Permafrost and changing climate: the Russian perspective // AMBIO: A Journal of the Human Environment. 2006.

температуры летом, когда риск проседания сооружений наибольший (рис. 1)^{6,8}.

В арктических регионах, где вечная мерзлота охватывает более 90% поверхности, будет увеличиваться главным образом глубина сезонного таяния. Здесь также могут возникать и развиваться талики под крупными реками и озёрами, с отрывом мерзлоты от поверхности и сохранением её в более глубоких слоях. В область наибольших значений индекса геокриологического риска попадает почти вся Чукотка (кроме северо-восточной оконечности полуострова), в том числе Билибинская атомная станция и связанные с ней линии электропередач от пос. Черского на реке Колыме до пос. Певека на побережье Восточно-Сибирского моря, а также Ямал, где значительное влияние может оказывать повышение солёности вод, арктическое побережье Якутии и Кольский полуостров.

Помимо действия климата на мерзлоту, в последнее десятилетие отмечено усиление разрушения берегов арктических морей за счёт повышения летних температур и усиления морского волнения.

В целом, в Арктическом регионе при планировании адаптационных мер к глобальным климатическим изменениям, безусловно, нужно предусматривать возможность двух-трёхкратного увеличения частоты сильных ветров, шквалов, штормов и т.п.

Несмотря на бытующее мнение, что вследствие глобального потепления таяние морских льдов положительно изменит возможности навигации по арктическим морям, окончательные выводы делать пока рано. Считается, например, что в ближайшие 20–30 лет, при сохранении существующей тенденции климатических изменений продолжительность навигации через пролив Вилькицкого (наиболее сложное место Северного морского пути в навигационном отношении) может увеличиться до 120 дней (сейчас она составляет около одного месяца). Однако важно учитывать, что потепление усилит процессы разрушения ледников, что резко повысит количество дрейфующих льдин и крупных айсбергов. Ещё более сильный негативный эф-

фект может дать большая подвижность полей паковых льдов. Ледяные массивы площадью в десятки квадратных километров могут отрываться от сплошного массива льдов, покрывающих Северный полюс, и дрейфовать отдельно. Всё это безусловно отразится на возможностях развития добывающей, транспортной, строительной и энергетической инфраструктуры арктического региона. По оценкам американских учёных, стоимость адаптации к влиянию климатических изменений на государственную инфраструктуру (дороги, морские порты, аэропорты, линии передач и т.д.) на Аляске может привести к росту финансовых вложений в развитие инфраструктуры на период до 2030 г. на величину около 13 млрд долл.¹² При этом экономия от адаптации будет значительнее при более быстром потеплении, нежели при медленном изменении климата.

Глобальные изменения климата в Арктическом регионе будут способствовать нарушению устойчивой работы всех отраслей хозяйства, включая энергетический комплекс, и дополнительно повышению себестоимости вырабатываемой энергии. Потребуются выделение дополнительного бюджетного финансирования на адаптацию существующей инфраструктуры к этим изменениям. В таких условиях единственным путём обеспечения бесперебойного энергоснабжения потребителей может стать развитие малой энергетики и локальное использование доступных местных возобновляемых энергоресурсов.

Несмотря на важность ресурсных рисков в Арктике, где наблюдается высокая пространственно-временная изменчивость ресурсных характеристик возобновляемых источников энергии, всё же наибольшую опасность представляет возникновение технологических рисков.

Причины возникновения факторов технологических рисков, выражающихся в сбоях в работе оборудования, могут быть связаны с ошибками, допущенными

¹² Larsen P., Goldsmith S., Smith O., Wilson M. Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change // *Environmental Change*. 2008.

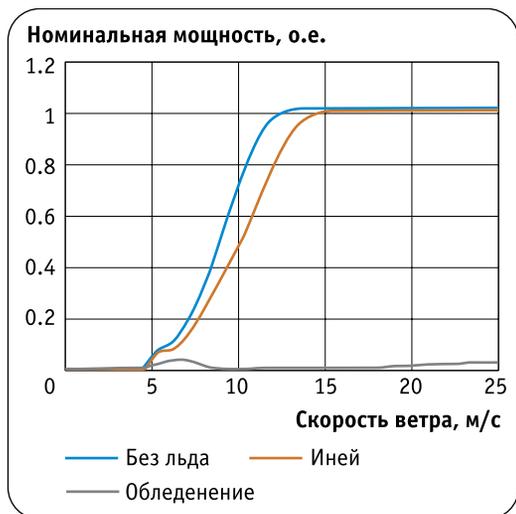


Рис. 2.
Зависимость номинальной мощности ВЭУ (в относительных единицах) от скорости ветра при различных условиях обледенения лопастей и оборудования.

при выборе и проектировании технологического оборудования, нарушениями технологических процессов. Это может быть связано с особенностями эксплуатации энергетического оборудования ВИЭ в суровых климатических условиях. Избежать действия данного вида риска возможно с помощью осуществления мер безопасности, использования сертифицированного технологического

Рис. 3.
Борьба с обледенением лопастей ВЭУ с помощью вертолёта.



оборудования, своевременного его ремонта и проведения адаптационных мероприятий. Так, для работы ВЭУ наибольшую опасность при работе оборудования в условиях Арктики могут представлять:

- снижение выработки ВЭУ из-за обледенения лопастей и оборудования;
- увеличение вибраций оборудования из-за дисбаланса от наледей;
- возникновение коротких замыканий при попадании влаги в электрическое оборудование;
- угроза поломки опор, башен и лопастей.

Для защиты оборудования от воздействия суровых климатических условий используется блочно-модульный принцип исполнения основного оборудования с размещением дизель-генераторов, накопителей и радиоэлектронной согласующей и управляющей аппаратуры в контейнерах с высокой степенью защиты от внешнего воздействия окружающей среды, а в ряде случаев – с внутренней системой климат-контроля¹³. Механизмы гондолы и лопасти ветроустановок требуют дополнительных мер по защите от обледенения и буревых нагрузок при их конструировании и изготовлении. В случае возникновения поверхностного обледенения наблюдается резкое снижение номинальной мощности оборудования ВЭУ, вплоть до его

¹³ Попель О.С. Перспективные технологии малой и возобновляемой энергетики для освоения и развития Арктической зоны Российской Федерации // Государственный аудит. Право. Экономика. 2017. № 1. С. 44–52.

полного отказа (рис. 2)¹⁴. Нарушение работы ВЭУ при обледенении обусловлено тем, что поверхностная ледяная корка снижает аэродинамические характеристики лопастей точно так же, как это иногда происходит с крыльями самолёта. В результате производительность ветроэнергетической установки падает. Кроме того, наледь нарушает балансировку ветроколеса, что приводит к повышенному износу подшипников и всего оборудования ветрогенератора в целом. Куски льда с концов вращающихся лопастей могут срываться и разлетаться на значительные расстояния. В Швеции для борьбы с экстремальным обледенением используются вертолёты, которые распыляют горячую воду, чтобы растопить ледяную корку на поверхности лопастей (рис. 3)¹⁵. Данный способ борьбы с обледенением преподносится как аварийный, который может использоваться лишь в крайних случаях. Однако стоимость такого способа борьбы со льдом весьма значительна и составляет величину стоимости электроэнергетики, получаемой за несколько дней работы ветряка. Поэтому для эксплуатации в арктических областях части ветрогенератора должны быть изготовлены из специальных морозостойких материалов и оборудованы эффективной системой антиобледенения. При этом все технические жидкости, используемые в генераторе, не должны замерзать.

В условиях арктической зоны России в существующих местах расположения ветряной генерации количество дней в году, когда может наблюдаться активное обледенение лопастей ВЭУ варьируется от 60 (г. Анадырь, Чукотский АО, 64° с.ш.) до 110 дней (пос. Амдерма, Ненецкий АО, 69° с.ш.).

Поэтому в регионах с высоким риском обледенения требуется выполнение спе-

циальных мероприятий по адаптации технологического оборудования ВЭУ:

- гидрофобное покрытие лопастей ветроколеса;
- замена пневматической системы торможения на электромеханическую;
- антикоррозийное покрытие статора и ротора генератора;
- установка системы обогрева гондолы и датчиков скорости и направления ветра;
- резервирование датчиков параметров ветра;
- усиленная конструкция башни ВЭУ из морозостойкой стали (С345);
- секционирование башни по весу не более 3 тонн/секция;
- бескрановой монтаж гидроцилиндров;
- замена резервных электрохимических аккумуляторов на суперконденсаторы;
- установка инвертора и шкафа управления ВЭУ в термостатированный контейнер;
- доставка оборудования в стандартных контейнерах;
- специальный фундамент для вечной мерзлоты.

Экономически обосновать эффективность применения систем адаптации оборудования ВИЭ можно путём сравнения **эффекта от снижения потерь** $S_{эф}$, вызванных воздействием неблагоприятных условий окружающей среды, и **стоимости самих адаптационных мероприятий** в отношении оборудования ВИЭ $S_{мер}$. Для этого воспользуемся следующими соотношениями¹⁴:

$$S_{эф} = S_{п1} - S_{п2},$$

$$S_{пi} = P_{\Sigma i} \cdot W \cdot S_{ЭЭ},$$

$$S_{мер} = S_{уст} + S_{то} + W_{CH} \cdot S_{ЭЭ},$$

где $S_{ЭЭ}$ – тариф на электроэнергию, руб./кВт·ч; $S_{пi}$ – стоимость потерь без применения адаптационных мероприятий ($i = 1$) и с применением ($i = 2$), руб.; $P_{\Sigma i}$ – суммарные потери без применения адаптационных мероприятий ($i = 1$) и с их применением ($i = 2$), %; W – годовая выработка электроэнергии без потерь от неблагоприятного воздействия

¹⁴Елистратов В.В. Проблемы и решения создания эффективных систем энергоснабжения потребителей Заполярья с использованием инновационных технологий ВИЭ. Москва: ООО "Системный консалтинг", 2017. 1–41 с.

¹⁵Nilsen J. Her spyler helikopteret bort et tykt lag med is – Tu.no [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tu.no/artikler/her-spyler-helikopteret-bort-et-tykt-lag-med-is/222975> (дата обращения: 27.06.2017).

окружающей среды, кВт · ч; $W_{\text{сн}}$ – годовой расход электроэнергии на проведение мероприятий по адаптации, кВт · ч; $S_{\text{уст}}$ – стоимость защитного мероприятия, руб.; $S_{\text{то}}$ – стоимость технического обслуживания мероприятия в процессе эксплуатации, руб.

Используя данную методику оценки с учётом статистической информации о работе энергоустановки и о погодных условиях в месте расположения объекта малой генерации (например, количество дней в году с условиями, способствующими обледенению лопастей ветровой турбины) можно сделать вывод о степени эффективности проведения адаптационных мероприятий оборудования ВИЭ. Так, например, выполненные оценки эффективности применения активных систем обогрева ВЭУ показали, что для пос. Амдермы такие системы неэффективны, так как минимальное число дней эффективного использования систем превышает число дней, когда происходят обледенения. В г. Анадыре, наоборот, минимальное число дней эффективного использования систем гораздо меньше числа дней с обледенениями, т.е. активные системы адаптации будут наиболее эффективны.

Важным элементом мероприятия по адаптации различного оборудования ВИЭ к неблагоприятным климатическим условиям является также разработка **интеллектуальных систем защиты (ИСЗ)** от экстремальных условий (обледенения, порывов ветра и высокой влажности воздуха).

Работа интеллектуальных систем защиты от экстремальных климатических условий должна быть основана на следующих базовых принципах:

1) ИСЗ должна в реальном времени максимизировать выработку энергии элементов оборудования ВИЭ и экономию топлива на дизельных электрических станциях при покрытии требуемой нагрузки.

2) Аппаратно-программное обеспечение ИСЗ должно обеспечивать дистанционный мониторинг параметров и режимов работы.

3) ИСЗ должна следить за состоянием оборудования, анализировать статистику

режимов его работы и обеспечивать прогнозирование режима доступности используемого ресурса ВИЭ для планирования графика работы, технического обслуживания, оценки рисков и предупреждения аварийных ситуаций.

4) Энергетическое оборудование, управляемое ИСЗ, должно быть адаптируемо к аварийным ситуациям и поставлять энергию круглосуточно, в том числе при выходе из строя части генерирующего оборудования.

Одной из основных проблем адаптации, связанных с использованием энергоисточников на базе ВИЭ, которую должно решать использование ИСЗ, является проблема стабильности генерации мощности, иными словами, способность обеспечивать непрерывный поток мощности потребителю. Фактор стабильности и способность оказывать влияние на качество работы всей энергосистемы вносят дополнительные риски, оценки которых должны быть учтены на этапе проектирования. Такие риски не столь актуальны для крупных централизованных энергосистем, где применяется множество средств автоматической релейной защиты на крупных электроподстанциях, но в большей степени на локальном уровне (например, энергосистема небольшого города, или посёлка), где нет возможности обеспечить постоянную стабильную отдачу мощности при совпадении частоты и фазы. Всё это в конечном итоге сказывается на качестве энергоснабжения конечных потребителей.

Управление вышеперечисленными факторами риска, или риск-менеджмент, зависит от возможности оценить и уменьшить вероятность наступления того или иного рискового события и своевременно провести адаптационные мероприятия. Суть риск-менеджмента заключается не в исключении рисков, что просто невозможно, а в их оптимизации и получении максимальной выгоды от складывающихся ситуаций посредством скоординированных действий по руководству и управлению в отношении рисков. Все виды рисков могут быть разделены на потенциально изменяемые

и неизменяемые, которые в свою очередь подразделяются на принимаемые и передаваемые. Изменяемые риски минимизируются в процессе подготовки инвестиционных проектов энергообъектов на ВИЭ. Неизменяемые риски можно принять на себя или передать другим (например, с помощью хеджирования¹⁶ или страхования).

В заключении следует отметить, что определение и ранжирование рисков

¹⁶Хеджирование – открытие сделок на одном рынке для компенсации воздействия ценовых рисков равной, но противоположной позиции на другом рынке.

по приоритетности, осознание их приемлемых уровней, возможностей минимизации является необходимым требованием при принятии управленческих решений в возобновляемой энергетике. **Выбор адекватных решений при практическом создании электростанций на основе возобновляемых источников энергии должен предусматривать использование только таких инновационных технологий, которые обеспечивают минимальные риски для окружающей среды и надёжную эксплуатацию в различных климатических условиях.**

Если Вас интересуют проблемы энергетики, экономики и экологии: энергетическая политика и безопасность стран и регионов, нефте- и газодобыча, энергопроизводство и его экологические последствия, энергосберегающие технологии, прошлое, настоящее и будущее атомной энергетики, перспективы развития местных возобновляемых гелио-, ветро- и гидроресурсов, доступно и точно изложенные ведущими отечественными и зарубежными специалистами, а также разнообразные социальные проблемы, связанные с развитием топливно-энергетического комплекса, и многое другое (вопросы образования, здоровья, управления, природопользования и т.д.), Вам, несомненно, нужен ежемесячный иллюстрированный журнал Президиума Российской академии наук:

“ЭНЕРГИЯ: ЭКОНОМИКА, ТЕХНИКА, ЭКОЛОГИЯ”

Наш девиз – доступность и достоверность.

Именно поэтому журнал “Энергия”

называют в числе самых авторитетных источников точной информации по проблемам экономики, экологии, энергетики.

Формат журнала удобен для:

- проведения дискуссий и рассмотрения различных точек зрения по актуальным проблемам развития энергетики и смежным научно-техническим направлениям;
 - рассмотрения новых и малоизученных методов получения и преобразования видов энергии, с выявлением их перспектив для практического применения.
- Будут приветствоваться также публикации обзорных статей:
- о деятельности различных отделений РАН;
 - о наиболее важных результатах фундаментальных научных исследований и прикладных разработок, полученных в ведущих отечественных институтах и университетах.

В дополнение к специальным материалам в каждом номере “Энергии”

Вы найдете материалы, посвященные гуманитарным проблемам современного мира.

В розничную продажу журнал не поступает. Подписной индекс – 71095. Желающие могут оформить льготную подписку в редакции. Тел.: 8(495)362-07-82.