
УДК 620.9

НОВЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕНТАБЕЛЬНОСТИ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ

© 2025 г. Р. Г. Василев², Т. Н. Гаева², В. М. Зайченко¹, А. А. Чернявский¹,
А. Л. Шевченко^{1,*}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт
высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение "Национальный
исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия
*e-mail: shev@jiht.ru

Поступила в редакцию 08.05.2024 г.

После доработки 24.02.2025 г.

Принята к публикации 28.02.2025 г.

В работе представлены предложения по развитию энергетики Российской Федерации, в основе которых лежат результаты совместных исследований и разработок Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (НИЦ "Курчатовский институт") и Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) по оптимальному использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности биомассы, с опорой на местные топливно-энергетические ресурсы. Представлен обзор энергоэффективных технологий получения качественного твердого топлива (торрефикация) из отходов биомассы, высококалорийного синтез-газа с минимальным содержанием жидкой фракции, углерод-углеродного материала (пироуглерода) из попутных нефтяных газов и отходов древесины, пример оптимального сочетания нескольких видов ВИЭ с минимизацией резервных мощностей. Внедрение предлагаемых технологий позволит не только снизить уровень выбросов углекислого газа и экологическую нагрузку на планету, но и повысить рентабельность производимой энергии.

Ключевые слова: углероднейтральная энергетика, снижение выбросов CO₂, биотопливо, утилизация отходов, распределенная энергетика, возобновляемые источники энергии, зеленая энергетика, торрефикация, синтез-газ, пироуглерод

DOI: 10.31857/S0002331025020019

В Советском Союзе была создана самая крупная в мире Единая энергетическая система (ЕЭС), которая по многим показателям превосходила энергосистемы развитых стран Европы и Америки. В основе ЕЭС лежало принципиальное решение, сформулированное еще в плане ГОЭЛРО: электроэнергетика в нашем государстве, по отношению к остальным отраслям промышленных технологий, должна развиваться опережающими темпами [1]. Рост технической вооруженности и быстрое изменение качественных показателей отрасли уже к 1950 году вывели страну

по выработке электроэнергии на первое место в Европе и на второе – в мире [2]. При переходе к рыночной экономике в 1990-е годы происходило снижение объемов производственной деятельности, падение экономических показателей и ухудшение качества жизни, что сопровождалось соответствующим снижением энергогенерации и деградацией генерирующих мощностей.

На современном этапе, на фоне значительного роста цен на ископаемые топливные ресурсы (уголь, нефть, газ, ядерное топливо) и все больше устаревающей отраслевой материальной базы, энергетика в Российской Федерации не является рентабельной. Эксплуатация многих электростанций без бюджетной поддержки стала убыточной, а инвестиция в строительство новых и реконструкцию действующих электростанций, учитывая низкие тарифы на электроэнергию, перестали окупаться в приемлемые сроки.

Вынужденным шагом для выхода из данной ситуации стало введение в 2010 году программы договоров о предоставлении мощности (ДПМ) [3, 4], обеспечивающих инвесторам возврат их вложений в сооружение (или модернизацию) объектов энергетики на срок до 10 или 15 лет за счет введения на этот период нерыночного механизма в виде повышенного тарифа на мощность, устанавливаемого для модернизированных и новых генерирующих объектов, с гарантированным покрытием повышенной стоимости из бюджетных средств. Таким образом, энергетика, бывшая в СССР одним из основных рычагов поддержки государственного бюджета и роста национального дохода, становится дотационной отраслью [5], подобно образованию, культуре, спорту, медицине, обороне и т.д.

Вместе с тем существуют реальные возможности вернуть энергетику России в зону рентабельности. Среди прорывных технологий в энергетике, выделенных академиком Алексеенко С.В. [6] для решения этой проблемы, наряду с паро-газовыми установками (ПГУ), повышающими КПД использования традиционных ископаемых видов топлива, важное место занимает разработка оптимальных моделей использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности биомассы, с опорой на местные топливно-энергетические ресурсы. Если в странах ЕС для получения возобновляемой биомассы специально выращивают быстрорастущие деревья и кустарники, в России такой необходимости нет. На территории России произрастает почти четверть всех лесов нашей планеты [7]. Одних только отходов лесопереработки и деревообработки достаточно, чтобы покрыть требуемый прирост в производстве электрической и тепловой энергии для энергоснабжения новых сооружаемых предприятий. Использование, наряду с этим, и других видов ВИЭ позволяет также обеспечить полную замену выводимого из эксплуатации устаревшего и изношенного технологического оборудования на существующих электростанциях.

К биомассе и ее отходам относятся также твердые коммунальные (бытовые), сельскохозяйственные отходы, осадки сточных вод и многое другое.

Использование биомассы в энергетике не нарушает природный экологический баланс: количество углекислого газа (CO_2), потребляемое из атмосферы при росте растений, соответствует количеству CO_2 , выделяемому при горении биомассы.

В соответствии с прогнозом Министерства экономического развития РФ на 2023–2025 гг. [8] ожидается, что в ближайшие годы экономика России будет уверенно развиваться достаточно высокими темпами, невзирая на санкционное давление Запада. Реалистичность опубликованных показателей подтверждается, в частности, тем, что в настоящее время ежедневно в стране вводятся в действие один–два

новых крупных инновационных промышленных предприятия или крупных цехов на действующих предприятиях.

Появление большого количества новых предприятий требует решения проблемы их гарантированного энергообеспечения.

На 1 января 2024 года общая установленная мощность электростанций ЭЭС России составила 263.1 тыс. МВт [9]. В 2023 году в ЭЭС России введено 734 МВт новых генерирующих мощностей, выведено из эксплуатации 423 МВт неэффективного и устаревшего генерирующего оборудования. В 2023 году электростанции ЭЭС России выработали 1134.1 млрд кВтч электрической энергии [9].

Планируемые темпы роста в энергетике на уровне 2.2% ежегодно [8] являются весьма высокими: ежегодный рост производства электроэнергии должен составлять: $2.2\% \times 1134.1 = 25.0$ млрд кВтч, а необходимый ежегодный прирост мощностей электростанций – $2.2\% \times 263100 \approx 5788.2$ МВт. Получение таких значений прироста выработки электроэнергии и мощности электростанций за счет использования ВИЭ потребует организации массового отечественного импортозамещающего производства нового оборудования для сооружения солнечных, ветроэлектрических, биомассовых, геотермальных и других энергогенерирующих объектов. При этом проектирование энергетических комплексов для каждой конкретной территории должно быть основано на выборе оптимального сочетания различных видов ВИЭ, дополняющих друг друга и позволяющих сократить необходимый объем резервирования мощностей [4, 7]. Необходимо отметить, что в любые варианты сочетания ВИЭ необходимо включать такие стабилизирующие компоненты, как генерирующие установки на биомассе, позволяющие обеспечить гарантированное бесперебойное снабжение потребителей электрической и тепловой энергией [4].

Общее количество биомассы, пригодное для использования в энергетике России в качестве топливных ресурсов, можно считать близким 950 млн м³ в год [10]. При средней насыпной плотности древесных отходов с влажностью 20–30%, составляющей 0.6 т/м³ [11], общую массу таких отходов можно рассчитать, как: $950 \text{ млн м}^3/\text{год} \times 0.6 = 570 \text{ млн т/год}$.

Количество электрической энергии, которое может быть получено при энергетической утилизации указанной массы отходов, может составить до 301.5 млрд кВтч/год [12]. Поскольку требуемый средний годовой прирост производства электроэнергии в Российской Федерации на ближайшие годы, как упоминалось выше, составляет 25.0 млрд кВтч, то было бы достаточно лишь 10% потенциальной энергии отходов биомассы, чтобы обеспечить отпуск электроэнергии всем новым потребителям в расширяющихся энергосистемах. Остальные 90% энергии из отходов биомассы могут быть, вместе с другими видами ВИЭ, использованы для замены устаревшего и отработавшего свой ресурс традиционного генерирующего оборудования в энергосистемах.

Высокая эффективность биомассы как возобновляемого источника энергии может быть обеспечена использованием новых отечественных разработок и изобретений содружества российских организаций включающего:

– Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва;

– Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт” (НИЦ “Курчатовский институт”), Москва;

– Публичное акционерное общество “Татнефть” им. В.Д. Шашина (ПАО “Татнефть”), Альметьевск, Республика Татарстан.

Эти разработки были инициированы институтом ОИВТ РАН в 2005–2010 гг. Позднее к ОИВТ РАН присоединились остальные участники группы.

Следующий ряд наиболее эффективных разработок группы этих организаций можно рекомендовать к широкому использованию.

КАЧЕСТВЕННОЕ ТВЕРДОЕ ТОПЛИВО ИЗ БИОМАССЫ НА ОСНОВЕ ТОРРЕФИКАЦИИ

Торрефикация – это процесс низкотемпературного пиролиза биомассы, который придает ей новые свойства, характерные для ископаемого угля: гидрофобность (устойчивость к воздействию окружающей среды в виде повышенной влажности воздуха и осадков), увеличение на 20–30% теплотворной способности, улучшенная измельчаемость, повышенный насыпной вес. Торрефицированное биотопливо можно непосредственно использовать в качестве замены каменного угля в стандартных пылеугольных котлах без существенной доработки последних. Во многих случаях на таких котлах достаточно заменить форсунки на серийно выпускаемые специальные горелки, предназначенные для работы на пеллетах. Кроме того, улучшенные свойства биотоплива снижают требования к условиям его транспортировки и хранения. Большим преимуществом является также и то, что, в отличие от каменного угля, торрефицированное биотопливо является углероднейтральным.

Известные зарубежные разработки технологии торрефикации биомассы характеризуются высоким энергопотреблением, что делает использование полученного торрефицированного топлива нерентабельным. В связи с этим интерес к данной технологии в последнее время снижается.

Новые разработки ОИВТ РАН по использованию управляемого экзотермического эффекта в процессе торрефикации позволяют увеличить энергетическую эффективность процесса в 3–5 раз [13, 14]. При этом обеспечивается также достаточно высокая финансовая и коммерческая эффективность производства торрефицированного биотоплива.

На сегодняшний день внутренний рынок твердого биотоплива из биомассы (древесных пеллет, брикетов, гранул и т.д.) в Российской Федерации развит слабо и находится в стадии становления. Большая часть производимого твердого биотоплива направляется на экспорт. До 2022 года основными импортерами российского биотоплива были страны ЕС и Турция. С 2022 года из-за западных санкций большая часть экспорта была перенаправлена в Южную Корею [15].

Объем производства пеллет в России за период с 2017 по 2021 год увеличился с 1.3 млн до 2.4 млн т [16, 17]. В 2022 году объем производства пеллет снизился до 2.1 млн т, причем более 90% из них были предназначены для экспорта. Цены на пеллеты на внутреннем энергорынке России за этот период выросли с 5.1 тыс. руб./т (57 US\$/т) до 8.1 тыс. руб./т (90 US\$/т), а экспортные цены на пеллеты в 2020–2023 годах составили 10.5–14.5 тыс. руб./т. Себестоимость производства торрефицированных пеллет по технологии ОИВТ РАН находится в диапазоне 3.0–4.0 тыс. руб./т, что говорит о коммерческой привлекательности разрабатываемой технологии получения высококачественного торрефицированного биотоплива.

ПОЛУЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННОГО СИНТЕЗ-ГАЗА ИЗ ОТХОДОВ БИОМАССЫ

Известные технологии получения энергетического газа из биомассы – газификация и пиролиз – обладают существенными недостатками: такой газ имеет низкую теплотворную способность и содержит определенное количество жидкой фракции, что не позволяет использовать его непосредственно в качестве топлива в электропроизводящих агрегатах. Разработанная технология двухстадийной термоконверсии биомассы (ДТКБ) с использованием схемы с двумя последовательно включенными реакторами – пиролиза и крекинга [4, 7, 18] – позволяет избежать недостатков, характерных для существующих технологий газификации и пиролиза. Получаемый на основе данной технологии из различных отходов биомассы синтез-газ имеет теплотворную способность на уровне 11 МДж/м³, а содержание в нем жидкой фракции составляет менее 50 мг/м³.

Проведенные исследования показали, что ДТКБ может использоваться для крупномасштабного производства синтез-газа с применением существующего серийного технологического оборудования с небольшими модификациями. А использование синтез-газа в качестве топлива на биоэлектростанциях (БиоТЭС и БиоТЭЦ) обеспечивает возможность когенерационного производства недорогой электрической и тепловой энергии [4, 19]. Это значительно повышает рентабельность самих энергетических установок на биомассе и увеличивает объемы отчислений от их эксплуатационной прибыли в бюджеты всех уровней.

В связи с заметной разницей между сетевыми тарифами на электроэнергию и себестоимостью электроэнергии, полученной с использованием синтез-газа из биомассы, наиболее высокоэффективной областью применения рассматриваемых технологий является их использование **для обеспечения собственного энергопотребления** различными предприятиями и организациями [18, 20].

Следующей областью экономически эффективного применения рассматриваемых систем, использующих ВИЭ, в т.ч. ТЭС на биомассе (БиоТЭС), является **замещение в удаленных, изолированных районах дизельных электростанций (ДЭС)**, работающих на дорогом привозном топливе [19]. Себестоимость производства электроэнергии на этих электростанциях во многих случаях достигает до 100 руб./кВтч, в то время как потребителям электроэнергия отпускается по утвержденным тарифам. Из-за высокой себестоимости электроэнергии на ДЭС все превышения ее стоимости над потребительским тарифом компенсируются из бюджетов различных уровней, включая государственный, территориальный и местный. По оценкам, общая сумма дотаций, требующихся для содержания ДЭС на удаленных территориях, составляет около 500 млрд руб. в год [21]. Это сопоставимо с объемом дефицита-профицита государственного бюджета Российской Федерации, планируемого на ближайшие годы [9].

Мощность и годовая выработка электроэнергии автономными энергоузлами на базе ДЭС на удаленных территориях оценивается в размерах 1733.3 МВт и 7.85 млрд кВтч соответственно [21].

Замена ДЭС системами, использующими ВИЭ, является оптимальным решением проблемы энергоснабжения удаленных территорий, исключающим бюджетные дотации на эксплуатацию ДЭС, что, в свою очередь, обеспечит увеличение доходов бюджета.

Оценки показывают, что суммарные инвестиции в замену всех ДЭС на удаленных территориях России составят не более 200 млрд руб. [21]. При вложении по 50...60 млрд руб.

инвестиций в год период полной замены рассматриваемых ДЭС в РФ составит 3–4 года. При этом будет получен более чем двукратный бюджетный доход.

С увеличением использования возобновляемых источников энергии в энергетике предстоит решить задачу создания эффективных и экономически выгодных систем накопления электроэнергии (СНЭ) большой емкости. Введение систем водородного аккумулирования, которые становятся все более популярными, могло бы обеспечить успешное решение технических аспектов данной проблемы. В то же время финансовая и коммерческая эффективность этих систем оставляют желать лучшего из-за высокой стоимости водорода, которая обусловлена основными применимыми методами его производства из ископаемых углеводородных топлив [21].

Дальнейшее преимущественное использование ископаемых топлив противоречит основной идее концепции энергоперехода к использованию возобновляемых источников энергии и соответствующим задачам, нашедшим отражение в Парижском соглашении 2015 года [22]. Кроме того, возрастает актуальность проблемы запасов ископаемых топлив в ближайшем будущем.

Синтез-газ из биомассы, произведенный по технологии ДТКБ, предлагается как альтернатива водороду в системах накопления электроэнергии. Данный газ, получаемый из биомассы, при его использовании в энергетике не будет оказывать повреждающее воздействие на экологию. При этом необходимо подчеркнуть такие его значительные преимущества, по сравнению с водородом, как:

- низкая себестоимость;
- более высокая удельная теплотворная способность на единицу объема;
- обеспечение более надежной работы и увеличение срока службы газопоршневых установок за счет полного исключения детонационных явлений в газовых двигателях.

С учетом вышеперечисленных преимуществ, применение синтез-газа позволяет создавать эффективные системы накопления электроэнергии с любой необходимой емкостью.

ПОЛУЧЕНИЕ ПИРОУГЛЕРОДА ИЗ ПОПУТНЫХ НЕФТЯНЫХ ГАЗОВ И ОТХОДОВ ДРЕВЕСИНЫ (БИОМАССЫ)

При пиролизе метана и его аналогов образуются два продукта: водород и углерод. Процесс может быть организован таким образом, что углерод приобретает форму продукта с высокой добавленной стоимостью, известного как “пироуглерод”. Пироуглерод представляет собой углерод-углеродный материал, который образуется в результате термического разложения углеводородных газов с отложением выделяющегося углерода из состава попутных нефтяных газов (ПНГ) или природного газа малорентабельных (низкодебитных и/или низконапорных) газовых месторождений, в пористых углеродных структурах [19, 23, 24]. Один из наиболее удобных методов получения таких пористых углеродных структур – термическая обработка биомассы с получением древесного угля (биоугля) для последующего плотного заполнения его пор углеродом.

При пиролизе попутных нефтяных и природных газов в слое биоугля образующийся углерод проникает в пористую структуру углеродной матрицы биоугля. Таким путем образуется материал, состоящий из углерода биомассы и углерода, полученного

в результате термического разложения углеводородных газов. Подобные материалы имеют хорошую перспективу для использования в различных промышленных технологиях в таких областях, как металлургия, атомная промышленность, химическая индустрия и т.д. В металлургии этот продукт позиционируется как заменитель углеродных материалов, используемых в сталеплавильном, доменном производстве и в процессах прямого восстановления железа. Благодаря уникальным свойствам пироуглерода инвестиции в его промышленное производство окупаются менее чем за три года.

Согласно данным Министерства природных ресурсов и экологии, значительная часть ПНГ, которая не находит эффективного использования, сжигается в факелах. Объем сожженного ПНГ в 2022 г. составил около 20 млрд м³ [25, 26]. В процессе сжигания попутный газ сгорает не полностью, и в атмосферу выбрасывается метан, который является еще более активным парниковым газом, чем CO₂. В связи с этим рациональное использование ПНГ становится важной задачей не только с экономической, но и с экологической точки зрения.

На основании проведенных исследований было установлено, что количество пироуглерода, которое может быть получено в нашей стране из сжигаемых объемов ПНГ, составляет 15 млн т в год. Но этого количества недостаточно для полного удовлетворения как внутреннего спроса на пироуглерод, так и экспортных потребностей [23, 24, 27], составляющих по оценкам 2024 г. не менее 25 млн т/год (bisnesstat.ru).

Новая технология позволяет одновременно с производством пироуглерода получать водород, при этом высокая отпускная цена пироуглерода способна покрыть значительную часть затрат на производство водорода. Согласно проведенным оценкам, объем водорода, который может быть получен при производстве пироуглерода из сжигаемых в настоящее время объемов ПНГ, составляет 3.57 млн т в год [21], что позволяет решить все планируемые в РФ задачи развития водородной энергетики, включая экспорт водорода [7, 25].

Используя этот водород в качестве топлива, можно произвести 71.8 млрд квтч электроэнергии при планируемом на перспективу КПД 60% с использованием генераторов на топливных элементах. Общая мощность всех энергоустановок, работающих на попутном водороде, может достигать 15.9 ГВт, что соответствует приблизительно 6.4% общей установленной мощности всех электростанций в Единой энергетической системе [21]. Учитывая дополнительное использование нерентабельных месторождений природного газа, доля электростанций, работающих на водороде, может вырасти до 12% в общей мощности ЕЭС [4, 7]. Такая доля мощности обеспечит достаточную надежность в резервировании производимой электроэнергии даже при полной замене традиционных тепловых и атомных электростанций на ВИЭ.

Таким образом, энергокомплекс по производству пироуглерода и водорода из сжигаемых в настоящее время ПНГ имеет высокую финансово-коммерческую эффективность. В качестве примера в табл. 1 представлены основные параметры энергокомплекса производительностью 1.0 т/ч пироуглерода, предназначенного для замены каменноугольного кокса в производстве высококачественных сталей.

При строительстве приблизительно 1000 или более подобных энергетических комплексов можно обеспечить доход, соответствующий планируемому дефициту государственного бюджета Российской Федерации на ближайшие годы. В связи с высоким спросом на пироуглерод и водород в различных отраслях экономики

Таблица 1. Основные параметры энергокомплекса производительностью 1.0 т/ч пироуглерода для металлургического производства

Наименование параметров	Единица измерения	Значение
Время использования установленной мощности энергокомплекса	ч/год	7500
Производительность энергокомплекса:		
– по пироуглероду	тыс. т/год	7.5
– по водороду	т/год	375.0
Отпускные цены (расчетный курс доллара США на III кв. 2024 г. – 90 руб./US\$):		
– на пироуглерод	тыс. руб./т (US\$/т)	10.0 (111.1)
– на водород	тыс. руб./т (US\$/т)	200.0 (2222)
Себестоимость производства:		
– пироуглерода	тыс. руб./т (US\$/т)	2.43 (27)
– водорода	тыс. руб./т (US\$/т)	45.17 (502)
Сметная стоимость энергокомплекса	млн руб.	156.6
Простой срок окупаемости затрат – PP	лет	2.1
Дисконтированный срок окупаемости – PBP	лет	2.5
Внутренняя норма рентабельности – IRR	%	48.0
Чистый суммарный дисконтированный доход бюджетов всех рангов – NPV	млн руб.	481.2

России проект по созданию таких энергетических комплексов представляется привлекательным для инвестиций.

Учитывая, что внутренние цены на металлургический кокс в России составляют от 15 до 30 тыс. руб. за т (167 до 333 US\$/т), отпускная цена на пироуглерод в размере 10 тыс. руб. за т обеспечивает приемлемые условия для его использования с целью замены кокса. Как показывают расчеты, себестоимость производства пироуглерода составляет ~2.5 тыс. руб. за т (27 US\$/т), что в 4 раза ниже отпускной цены (табл. 2). При необходимости достижения более конкурентоспособных условий отпускная цена на пироуглерод может быть снижена до 6–8 тыс. руб. за т, однако это может сопровождаться некоторыми потерями в показателях финансово-коммерческой эффективности инвестиций.

При организации экспорта пироуглерода можно рассчитывать на получение дополнительной прибыли, так как цены на органические виды топлива за рубежом, в странах Европейского союза, Японии и Китае значительно выше, чем в России [28, 29].

В странах Европейского союза текущие цены на пироуглерод с содержанием чистого углерода не менее 99% составляют от 600 до 1000 US\$/т, в Китае – от 400 до 800 US\$/т [30]. Принимая во внимание, что себестоимость производства пироуглерода

в России, с учетом транспортных, логистических и накладных расходов, составляет 150 US\$/т, экспорт пироуглерода может дать существенный доход в бюджет страны [30, 31].

Помимо этого, существует также возможность экспортировать разработанную технологию производства пироуглерода и водорода за рубеж. Эффективность инвестиций в строительство энергетического комплекса, основанного на данной технологии, будет зависеть от локализации площадки для строительства и экономических условий реализации проекта. В то же время, независимо от указанных факторов, ожидается, что инвестиции в подобный проект принесут положительную отдачу со сроком окупаемости в пределах 7–10 лет.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СОЧЕТАНИЙ ВИЭ ПРИ СОЗДАНИИ НОВЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

С помощью использования различных комбинаций возобновляемых источников энергии возможно уменьшить потребность в резервных мощностях для обеспечения надежного энергоснабжения и минимизировать объемы резервирования электрической энергии [4, 7, 18, 19]. В качестве примера можно рассмотреть разработанное совместно с институтом “Ростовтеплоэлектропроект” технико-коммерческое предложение по созданию на основе ВИЭ системы энергоснабжения крупных насосных станций Шахтинско-Донского водовода (ШДВ) в Усть-Донецком районе Ростовской области. Для энергоснабжения ШДВ предложено использование солнечно-ветряной электростанции с аккумулярованием на синтез-газе. Солнечная часть энергокомплекса установленной мощностью 15.6 МВт включает фотоэлектрические модули суммарной площадью 120 тыс. кв. м. Ветроэлектрическая часть суммарной установленной мощностью 15.8 МВт содержит 5 ветроагрегатов мощностью по 3.15 МВт каждый. Балансирующие мощности в объеме 2.6 МВт предусматривают использование БиоТЭС. Малое значение резервных мощностей – всего 7.6% от установленной мощности энергокомплекса – обеспечивается соответствующим выбором солнечной, ветряной и балансирующей биоэнергетической составляющих, взаимно дополняющих друг друга, как показано на рис. 1.

Предложенный энергокомплекс обеспечивает достаточно высокую эффективность [4]. Срок окупаемости капложений составляет 4.6 года, дисконтированный период возврата инвестиций – 7.5 лет, внутренняя норма доходности – около 18%. В рассматриваемом примере в составе энергокомплекса используют солнечную электростанцию (СЭС), ветроэлектрическую станцию (ВЭС) и электростанцию на биомассе, т.е. сочетание СЭС + ВЭС + БиоТЭС. В зависимости от наличия на конкретных территориях определенных потенциалов других возобновляемых источников энергии могут быть использованы и иные сочетания электростанций на базе ВИЭ: СЭС + МиниГЭС + БиоТЭС, ВЭС + МиниГЭС + БиоТЭС, СЭС + + ГеоТЭС (геотермальная электростанция), ВЭС + ГеоТЭС, СЭС + ВЭС + ГеоТЭС, СЭС + ВЭС + ПЭС (приливная электростанция) и др.

В России в настоящее время отмечается задержка в темпах развития систем, использующих возобновляемые источники энергии, по сравнению с показателями их внедрения в других странах. С учетом вышеизложенного, в Государственную программу РФ “Развитие энергетики” [32] представляется целесообразным включить конкретизацию относительно мест размещения и последовательности внедрения различных видов ВИЭ, в том числе БиоТЭС, на территории России, установить

сроки реализации и источники финансирования. Данная программа должна быть связана с общими планами развития экономики и энергетики на всех территориях, а также с возможностями отрасли энергомашиностроения по освоению новых продуктов для развития ВИЭ. В рамках программы следует также составить и утвердить планы по замене экспортируемых в настоящее время первичных энергоносителей — ископаемых углеводородов (угля, нефти, газа) — на более качественную и прибыльную энергетическую продукцию, разрабатываемую в рамках передовых национальных проектов. В целом энергетика должна стать одним из основных источников наполнения доходной части государственного бюджета Российской Федерации, подобно тому, как это было в СССР.

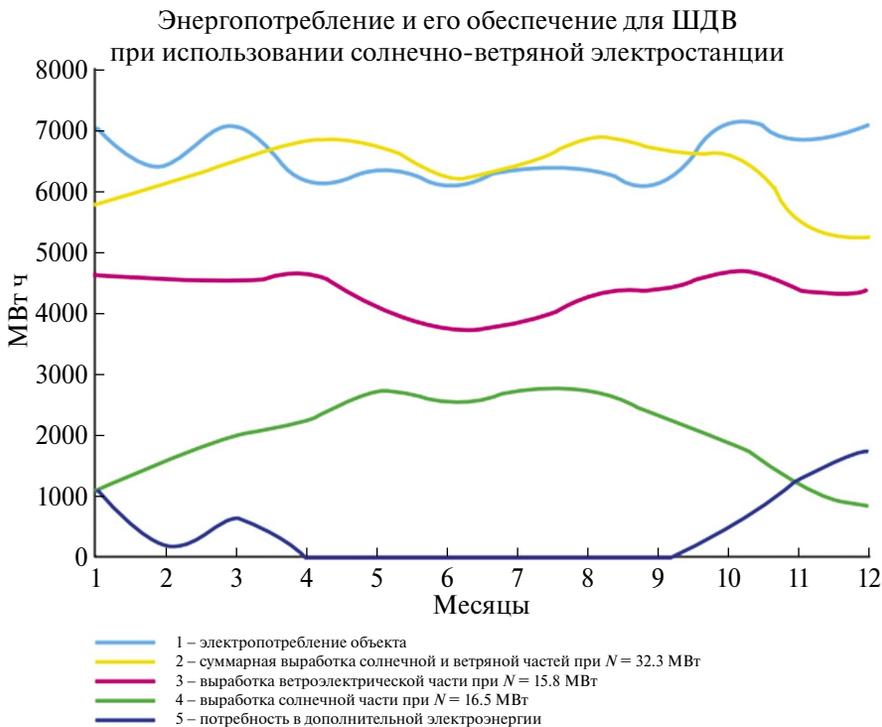


Рис. 1. Графические зависимости, иллюстрирующие параметры работы энергокомплекса ШДВ.

ВЫВОДЫ

Российская Федерация обладает возможностями для успешной реализации к середине XXI века энергоперехода, направленного на преимущественное использование ВИЭ, с учетом применения технологических концепций, предложенных в данной работе.

На начальной стадии внедрения ВИЭ наиболее эффективным следует признать создание энергогенерирующих мощностей для обеспечения собственных потребностей предприятий, а также для замены существующих дизельных электростанций в удаленных территориальных районах, не имеющих централизованного энергоснабжения.

Важно отметить значительный экономический эффект, который может быть достигнут путем рационального использования отходов биомассы с применением инновационных технологических решений, предложенных ОИВТ РАН и НИЦ “Курчатовский институт”. В связи с большой разницей в ценах на товары и услуги между Россией и зарубежными странами важно также развивать экспорт новых видов товаров и технологий, основанных на использовании биомассы. Это могут быть синтез-газ и связанные с ним энергетические установки (БиоТЭС) или энергия на их основе, пироуглерод и получаемый одновременно с ним водород, торрефицированное твердое топливо из биомассы, комбинированные энергетические установки с использованием ВИЭ, оборудованные системами хранения и резервного накопления энергии на биомассе, а также жидкие биотоплива, такие как биобензин, биометанол, биоэтанол и другие виды топлива, производимые из синтез-газа. Возможность использования не самой биомассы, а отходов биомассы, которые практически бесплатны и широко распространены в России. К ним можно отнести отходы древесной биомассы на многочисленных предприятиях лесопереработки – ветки и корни деревьев, сучья, обрезки, опилки; на предприятиях деревообработки (лесопильных – по производству досок, фанеры и других слоистых строительных материалов, мебельных фабрик и производящих бытовые изделия из дерева и др.) – опилки, стружки, кусковые отходы, бракованные изделия и т.п. При этом целесообразно размещать БиоТЭС на небольшом удалении от таких предприятий лесопереработки и деревообработки. Все это и определяет высокую конкурентоспособность предлагаемых биоэнергетических продуктов и технологий их получения, а также высокие показатели финансово-коммерческой эффективности. Наряду с этим обеспечивается дополнительная возможность существенного пополнения бюджетов всех уровней и происходит сокращение объемов продаж ископаемых топлив (угля, нефти, природного газа) за рубеж. Прогнозируемые результаты будут способствовать росту ВВП и национального дохода, а также стимулировать развитие российского энергетического сектора и экономики в целом.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00269-25-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ольховский Г.Г.* Современное состояние отечественной энергетики и план ГОЭЛРО / Ольховский Г.Г. // Энергетик. 2020. № 11. С. 20.
2. *Стеклов В.Ю.* Развитие электроэнергетического хозяйства СССР / Стеклов В.Ю. 2-е издание, дополненное. М.-Л.: Энергия, 1964. 160 с.
3. *Мировая энергетика – 2050 (Белая книга)* / Под ред. В.В. Бушуева и В.А. Каламанова. – М.: Издательский дом “Энергия”, 2011. 360 с.
4. *Зайченко В.М.* Создание систем гарантированного энергообеспечения с использованием комбинированных источников энергии / Зайченко В.М., Чернявский А.А. // Энергетическая политика 2020. № 10 (152). С. 96–103.
5. *Мировая энергетика 2020–2050 гг.* // International Energy Outlook. 2021 IEO.
6. *Алексеев С.В.* Прорывные технологии в энергетике на ближайшие 10 лет. / Алексеев С.В. // Энергетика. Экология. Энергосбережение. Тезисы докладов. – Калуга: Издательство Манускрипт, 2021. С. 9–10.

7. *Зайченко В.М.* Развитие водородной энергетики в России / Зайченко В.М. и др. М.: Издательский дом “Недра”. 2021. 71 с.
8. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов. – М.: Минэкономразвития России / Росстат – ФТС России, 2022.
9. Отчет о функционировании Единой энергетической системы России в 2023 году. – М.: АО “Системный оператор ЕЭС”, 19.01.2024 (сайт www.so-eps.ru).
10. Ресурсы биомассы в России / Новости науки [Электронный ресурс]. – URL: <http://novostynauki.com/e-ntsiklopediya/bioenergetika/resursy-biomassy-v-rossii-kak-energeticheskogo-topliva/> – 2021 (дата обращения: 21.03.2024).
11. Насыпная плотность отходов / Отходы.Ру – отраслевой каталог [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.waste.ru> (дата обращения: 21.03.2024).
12. Энергетические характеристики биомассы / Gigavat.com [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gigavat.com> (дата обращения: 21.03.2024).
13. *Shevchenko A.L.* Energy efficient technology for torrefied biofuel production / Shevchenko A.L., Sytchev G.A., Zaichenko V.M. // In: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. 2020. С. 927–1198.
14. *Директор Л.Б.* Сравнение эффективности реакторов низкотемпературного пиролиза биомассы / Директор Л.Б., Зайченко В.М., Исьёмин Р.Л., Чернявский А.А., Шевченко А.Л. // Теплоэнергетика. 2020. № 5. С. 60–69.
15. Рынок пеллет в России (ежемесячный ценовой обзор) / Финансы&Рынки. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.news.myseldon.com/whatwood.ru> – март 2023. (дата обращения: 21.03.2024).
16. *Бутырина Е.* Южная Корея вместо Европы стала крупнейшим покупателем российского биотоплива / ФедералПресс. – авг. 2023.
17. Российский рынок топливных гранул (пеллет) в 2017–2023 гг. / ЛПК Сибири – авг. 2023 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.lpk-sibiri.ru> (дата обращения: 21.03.2024).
18. *Зайченко В.М.* Возможности биоэнергетического перехода в России / Зайченко В.М., Чернявский А.А., Шевченко А.Л. / Энергетическая политика. 2021. № 11 (165). С. 16–29.
19. *Зайченко В.М.* Автономные системы / Зайченко В.М., Чернявский А.А. – М.: Издательский дом “Недра”. 2015. 285 с.
20. *Фортвов В.Е.* Энергетика в современном мире / Фортвов В.Е., Попель О.С. – Долгопрудный: Издательский дом “Интеллект”. 2011. 168 с.
21. *Бушуев В.В.* Новые российские разработки для оптимизации энергоперехода / Бушуев В.В., Васильев Р.Г., Зайченко В.М., Чернявский А.А. // Энергетическая политика. 2023. № 4 (182). С. 26–47.
22. Парижское соглашение [Электронный ресурс]. – URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf (дата обращения: 21.03.2024).
23. *Директор Л.Б.* Моделирование процессов термического разложения природного газа / Директор Л.Б., Майков И.Л., Зайченко В.М., Кудрявцев М.А., Сокол Г.Ф., Шехтер Ю.В. // Препринт № 2-452. М. 2001. 60 с.
24. *Popov R.G., Shpilrain E.E., Zaichenko V.M.* Natural gas pyrolysis in regenerative gas heater, Part II:) 335–339. Natural gas pyrolysis “in the free volume” of regenerative gas heater, Int. J. Hydrogen Energy 24 (1999).

25. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации / Постановление Правительства РФ от 05.08.2021 № 2162-р.
26. В России все больше газа сжигают в факелах / РИА Рейтинг. Макроэкономика и отрасли // Ежеквартальный бюллетень “Нефтегазовый комплекс”. – 23.08.2022.
27. Director L.B. A Theoretical Study of Heterogeneous Methane Reaction Processes / Director L.B., Maikov I.L. Zaichenko V.M. // Proceedings of the Twelfth International Heat Transfer Conference, Grenoble, France. 2002, pp. 929–934.
28. Цены на бензин в Европе [Электронный ресурс]. – URL: <https://autotraveler.ru/spravka/benzine-in-europe.html> (дата обращения: 21.03.2024).
29. Рейтинг стран по стоимости газа для населения [Электронный ресурс]. – URL: <https://svspb.net/novosti/stoimosti-gaza> (дата обращения: 21.03.2024).
30. Каталог “Made-in-China” [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.en.wikipedia.org/made-in-china> – 2023. (дата обращения: 21.03.2024).
31. Виклайн [Электронный ресурс]. – URL: http://www.virline.ru/транспортные_услуги – 2022. (дата обращения: 21.03.2024).
32. Государственная программа Российской Федерации “Развитие энергетики” [Электронный ресурс]. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/323> (дата обращения: 21.03.2024).

New Methods of Increasing the Profitability of Energy Sector in Russia

R. G. Vasilov², T. N. Gaeva², V. M. Zaichenko¹, A. A. Chernyavsky¹, A. L. Shevchenko^{1,*}

¹Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

**e-mail: shev@jiht.ru*

The paper presents proposals for the development of the energy sector of the Russian Federation, based on the results of joint research and development of the National Research Center “Kurchatov Institute” (NRC “Kurchatov Institute”) and the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS) on the optimal use of renewable energy sources (RES), in particular biomass, based on local fuel and energy resources. A review of energy-efficient technologies for obtaining high-quality solid fuel (torrefaction) from biomass waste, high-calorie synthesis gas with a minimum content of the liquid fraction, carbon-carbon material (pyrocarbon) from associated petroleum gases and wood waste is presented, an example of the optimal combination of several types of RES with minimization of reserve capacities. The implementation of the proposed technologies will not only reduce the level of carbon dioxide emissions and the environmental burden on the planet, but also increase the profitability of the energy produced.

Keywords: carbon-neutral energy, reduction of CO₂ emissions, biofuel, waste disposal, distributed energy, renewable energy sources, green energy, torrefaction, synthesis gas, pyrolytic carbon