

УДК 62-665.9

КОГЕНЕРАЦИОННАЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКА С ТОПЛИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ НА ОСНОВЕ ВНУТРИЦИКЛОВОЙ КОНВЕРСИИ ОРГАНИЧЕСКОГО СЫРЬЯ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

Казаков Александр Владимирович,

канд. техн. наук, доцент кафедры парогенераторостроения
и парогенераторных установок Энергетического института ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: kazakov@tpu.ru

Заворин Александр Сергеевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой парогенераторостроения
и парогенераторных установок Энергетического института ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: zavorin@tpu.ru

Новосельцев Павел Юрьевич,

инженер кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: pavel2906@rambler.ru

Табакеев Роман Борисович,

инженер кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: TabakaevRB@tpu.ru

Разработка энергетических установок для энергоснабжения децентрализованных потребителей составляет актуальную задачу научных исследований и подтверждается современным вектором развития малой энергетики.

Цель исследования: разработка и технико-экономическое обоснование освоения инновационных технологий энергетического использования низкосортных топлив в малой энергетике в когенерационных установках с топливным элементом. В работе использованы экспериментальные и расчётные методы исследований. Создана экспериментальная модель когенерационной энергоустановки, позволяющая проверять принцип действия и определять характеристики разрабатываемых технических решений когенерационной энергоустановки. На экспериментальной модели проведены исследования, результаты которых положены в основу расчёта конструкции энергоустановки. По итогам проектирования энергоустановки выполнена её технико-экономическая оценка.

Результаты: разработана конструкция энергетической установки и предложено технико-экономическое обоснование целесообразности её внедрения. В качестве выводов отмечено: разработана новая конструкция когенерационной энергоустановки с топливным элементом на основе внутрицикловой конверсии органического сырья для автономного энергообеспечения; капитальные затраты на производство когенерационных установок превосходят стоимость существующих дизельных электростанций, однако низкие эксплуатационные затраты, определяемые стоимостью топлива, приводят к быстрой окупаемости затрат; бюджетная эффективность проекта по замещению действующего парка дизельных электростанций когенерационными установками определяется экономией затрат на топливную составляющую в процессе выработки электроэнергии, которая может достигать уровня 73 млн р./год; ожидаемый интегральный эффект от реализации проекта по замещению действующего парка ДЭС когенерационными установками на территории Томской области в течение 5 лет находится на уровне 255 млн р., что свидетельствует об экономической целесообразности тиражирования когенерационных установок.

Ключевые слова:

Когенерационная энергоустановка, топливный элемент, внутрицикловая конверсия, органическое сырьё, автономное энергообеспечение.

Введение

Актуальность вопросов использования местных низкосортных топлив обеспечивается соответствием современным тенденциям энергосбережения, в частности направлению вовлечения в топливный энергетический баланс низкосортных топлив и обеспечения электро- и теплотенергией районов децентрализованного энергоснабжения [1–3]. Согласно «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» [1], целью которой является максимально эффективное использование при-

родных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для устойчивого роста экономики, повышения качества жизни населения страны и содействия укреплению её внешнеэкономических позиций, в качестве приоритетных направлений научно-технического прогресса в энергетическом секторе по направлению «Возобновляемые источники энергии и местные виды топлива» выделены следующие:

- развитие технологий использования возобновляемых источников энергии, а также много-

функциональных энергетических комплексов для автономного энергообеспечения потребителей в районах, не подключённых к сетям централизованного энергоснабжения;

- расширение производства и использования новых видов топлива, получаемых из различных видов биомассы.

Предполагается [1], что к 2030 г. в Центральном, Южном, Сибирском и Дальневосточном федеральных округах возрастёт роль использования местных источников энергии, производство на их основе энергии в удалённых и изолированных районах. Доля тепла, производимого на теплоэлектроцентралях в системах централизованного теплоснабжения, уменьшится с 43 (2005 г.) до 35 %. Эту нишу должны занять газотурбинные установки на теплоэлектроцентралях и автономные теплоснабжающие установки. Малоэтажная застройка, как правило, должна будет обеспечиваться индивидуальными теплогенераторами. Для достижения этих целей необходима модернизация и развитие систем децентрализованного теплоснабжения с применением высокоэффективных конденсационных газовых и угольных котлов, когенерационных, геотермальных, теплонасосных и других установок, а также автоматизированных индивидуальных теплогенераторов нового поколения для сжигания разных видов топлива.

Одной из основных проблем [1] в региональной энергетической политике является недостаточное развитие малой энергетики и низкая вовлечённость в энергобалансы местных источников энергии регионального и локального значения, решение которой предполагает максимизацию экономически эффективного использования местных источников топливно-энергетических ресурсов, развитие экономически эффективных децентрализованных и индивидуальных систем теплоснабжения. Для этих целей предполагается:

- стимулирование использования местных топливно-энергетических ресурсов (возобновляемые источники энергии, местные виды топлива, отходы и прочее) с последующим их вовлечением в региональные топливно-энергетические балансы;
- оптимизация региональных систем теплоснабжения на основе экономически эффективного сочетания централизованного и децентрализованного теплоснабжения;
- доведение доли местных источников энергии в региональных топливно-энергетических балансах до 20 %;
- формирование устойчивой системы энергетического обеспечения труднодоступных и удалённых территорий на основе расширенного эффективного использования местных энергоресурсов;
- формирование региональных энергетических систем на основе экономически эффективного сочетания использования местных и привозных источников энергии.

В интересах развития российской энергетики, распространяемых в том числе и на объекты малой энергетики, следует развивать направление исследований в области генерации тепловой и электрической энергии для автономных децентрализованных потребителей. Как показывает практика, проблема децентрализованных потребителей заключается в удалённости от транспортных схем, чтократно увеличивает стоимость доставки топливных ресурсов. Зачастую в таких удалённых районах имеются запасы местных низкосортных топлив, которые можно использовать в качестве энергоносителя, но характеристики этих топлив настолько осложняют организацию процесса прямого сжигания в топках котлов, что на практике используются в редких случаях [4, 5].

Меморандум о создании и деятельности технологической платформы «Малая распределённая энергетика» гласит, что одними из основных сфер применения новых технологических решений малой распределённой энергетики являются [6]:

- когенерационные установки для модернизации коммунальной инфраструктуры поселений;
- типовые комплекты оборудования и модульные технологические решения для энергоснабжения удалённых и изолированных потребителей;
- комплексные локальные энергосистемы с максимально возможным использованием местных топливных ресурсов.

Одними из основных направлений технологического развития, поддерживаемыми в рамках технологической платформы, являются [6]:

- технологии генерации электрической и тепловой энергии, в том числе топливные элементы, водородная энергетика;
- технологии использования местных энергетических ресурсов, в том числе современные технологии использования торфа как топливного ресурса, газификация местных топливных ресурсов, отходов производства и бытовых отходов с использованием синтез-газа для генерации энергии.

Существующий уровень исследований в области вопросов газификации позволяет создавать установки, перерабатывающие как качественные угли, так и низкосортные топлива, но их масштабное внедрение ограничено конкурентными преимуществами действующих крупных станций. Газогенераторные технологии можно считать едва ли не единственным вариантом переработки низкосортных местных топлив в отдалённых децентрализованных районах [7].

Сегодня остро стоит вопрос об энергоснабжении децентрализованных потребителей как в коммунальном хозяйстве, так и в производстве. По данным [3], на территории Томской области было расположено 38 пунктов с населением 36 тыс. человек, электроснабжение которых осуществляется от дизельных электростанций (ДЭС), находящихся в муниципальной собственности администраций районов и переданных на обслуживание пред-

приятиям ЖКХ. Общий парк дизель-генераторных установок в муниципальных ДЭС насчитывал более 100 машин суммарной установленной мощностью 50 тыс. кВт, вырабатывающих порядка 50 млн кВт·ч электроэнергии при расходе дизельного топлива на сумму, превышающую 120 млн р. в ценах 2002 г. При этом все 38 населённых пунктов обладают собственными запасами низкосортных топлив. Использование когенерационных систем на основе двигателей внутреннего сгорания, сжигающих привозное дизельное топливо, является пережитком прошлого и требует замещения путём внедрения новых технологий комбинированной выработки тепловой и электрической энергии из местных низкосортных топливных ресурсов [8, 9]. В связи с этим вполне закономерно ставить вопрос о вовлечении в топливно-энергетический баланс местных видов топлива. Таким образом, работы по темам, связанным с исследованиями в области энергоснабжения удалённых потребителей на базе когенерационных установок, генерирующих синтез-газ на основе местных топлив, с использованием топливных элементов, представляются актуальными [10].

Целью настоящих исследований является разработка и технико-экономическое обоснование освоения инновационных технологий энергетического использования низкосортных топлив в малой энергетике в когенерационных установках с топливным элементом.

Когенерационная энергоустановка

Основная идея исследованной технологии внутрицикловой конверсии заключается в низкотемпературной внутрицикловой термической переработке местных низкосортных топлив высокой влажности в пиролизёре и получении водородсодержащего синтез-газа путём применения высокоэффективной технологии паротепловой каталитической конверсии углерода топлива. Электрическая энергия вырабатывается топливным элементом, топливом для которого служит водородсодержащий газ, произведённый в процессе низкотемпературной внутрицикловой конверсии местного низкосортного органического сырья [11]. Повышенная концентрация водорода при низкой забалансированности газов достигается за счёт отсутствия воздушного дутья с введением в зону реагирования перегретого пара и оксидов железа [12]. Тепловая энергия производится за счёт утилизации теплоты, выделяемой на топливном элементе, и в процессе доокисления пиролизных газов на каталитических элементах [13]. Повышение экономической эффективности и экологических показателей достигается за счёт комплексного использования побочных продуктов (углеродистый остаток, пиролизный конденсат) основного процесса в технологиях производства брикетного топлива [14–16]. Низкие температуры основных процессов позволяют менее требовательно подходить к выбору материалов для изготовления энергоустановки.

Когенерационная энергоустановка (рисунок) [17] имеет корпус – 1, покрытый теплоизоляцией – 2. Внутри корпуса размещён пиролизёр – 3, представляющий собой сосуд цилиндрической формы, в верхней части которого смонтировано устройство – 4 для непрерывной подачи топлива. По всему объёму пиролизёра выполнены каналы – 5 для ввода газифицирующего агента. Нижняя часть пиролизёра соединена с конусообразной колосниковой решёткой – 6. Пиролизёр совмещён с газовой камерой сгорания – 7, в нижней части которой расположена металлическая сетка – 8 с нанесённым на неё катализатором. За металлической сеткой расположен кислородно-водородный топливный элемент – 9 и воздушная камера – 10. В верхней части корпуса на выходе дымовых газов предусмотрены теплообменник – 11 и дымовая труба – 12. Зольный остаток, образующийся при пиролизе твёрдого топлива в пиролизёре, удаляется системой золоудаления – 13 [18, 19].

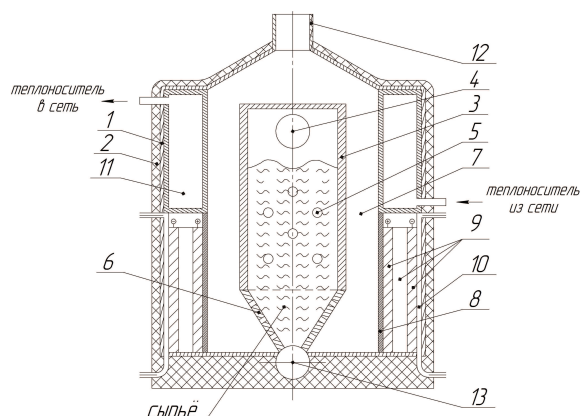


Рисунок. Когенерационная энергоустановка: 1 – корпус; 2 – теплоизоляция; 3 – пиролизёр; 4 – подача топлива; 5 – ввод газифицирующего агента; 6 – колосниковая решётка; 7 – камера сгорания; 8 – катализатор; 9 – топливный элемент; 10 – воздушная камера; 11 – теплообменник; 12 – дымовая труба; 13 – система золоудаления

Принцип работы энергоустановки заключается в следующем: пиролизёр заполняется топливом через устройство для подачи топлива, после этого по каналам ввода газифицирующего агента из внешнего парогенератора подаётся перегретый пар с температурой 300...500 °С. В ходе процесса низкотемпературного пиролиза выделяется обогащённый водородом газ, поступающий в газовую камеру сгорания через колосниковую решётку. В газовой камере водород реагирует с катализатором, нанесённым на металлическую сетку, и топливным элементом, омываемым воздухом из воздушной камеры. В результате чего топливный элемент вырабатывает электрический ток. Доокисление горючих газов происходит на катализаторах, нанесённых на поверхность теплообменника. При этом происходит выделение тепла для нагрева сетевого теплоносителя посредством конвекционного теплообмена. Охлаждённые дымовые газы покидают

установку через дымовую трубу. В качестве катализатора использованы нанопорошки ($\text{Ni}+\text{NiO}$, $75\text{ZrO}_2+25\text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{NiF}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $10\text{SrO}+90\text{Fe}_2\text{O}_3$, $85\text{ZrO}_2+15\text{Fe}_2\text{O}_3$) [20]. Верхний температурный предел работы установки выбран из соображения использования в технологическом процессе углеродистых сталей, способных работать при температурах до 500°C , что позволяет снизить стоимость когенерационной энергоустановки.

Конструкторский расчёт проводился для установки, использующей в качестве топлива торф с характеристиками: влажность 30,1 %, зольность 4,5 %, теплота сгорания 8,1 МДж/кг. Результатами расчёта являются расходные характеристики и основные геометрические размеры установок (табл. 1).

Таблица 1. Расчётные параметры установки на 100 кВт электрической и 100 кВт тепловой мощности

Параметр	Значение параметра
Расход топлива, кг/ч	116
Диаметр установки, м	1,1
Высота установки, м	3,0
Размер угольного электрода ($d \times h$), мм	0,07×1
Количество электродов, шт.	80
Количество теплообменных труб, шт.	246

Определение экономического эффекта от замены парка ДЭС на когенерационные установки произведено сопоставлением ежегодных затрат на содержание ДЭС и тех выгод, в денежном выражении, которые могут быть получены от использования когенерационных установок. Для этого определено:

- затраты на производство и эксплуатацию когенерационных установок;
- бюджетная эффективность замещения ДЭС когенерационными установками;
- анализ чувствительности, в зависимости от сценариев развития проекта;
- ожидаемый интегральный эффект.

Технико-экономическая эффективность

В качестве метода анализа эффективности внедрения инновационных энергетических технологий на основе когенерационных установок выбран алгоритм из работы [21], посвящённой созданию инструментов оценки эффективности инвестиций в инновационные энерготехнологии. Алгоритм основан на комплексной оценке энергопотребления, энергоресурсов, новой технологии и экологии. На основе данного алгоритма проведена сравнительная эффективность внедрения новых когенерационных установок и существующих ДЭС.

Для оценки энергопотребления и энергоресурсов удалённых населённых пунктов в первую очередь определяется потребность в топливе и выполняется анализ возможностей добычи энергоресурсов. Для этого анализа выполняется предварительная технико-экономическая оценка, подразуме-

вающая оценку экологической обстановки в районе и прогноз технико-экономических показателей местных энергоресурсов. В случае отрицательных результатов технико-экономической оценки делается вывод о нецелесообразности инвестирования выбранных энергетических технологий. В случае положительных результатов формируется сценарий освоения инновационных энергетических технологий. После этого, исходя из оценки экологической обстановки, делается вывод об уменьшении или увеличении вредных выбросов с применением новых технологий. В случае превышения предыдущих показателей по вредным выбросам делается вывод о нежелательности использования этих технологий и их внедрение отклоняется. При уменьшении этих выбросов, и исходя из сформированных сценариев освоения инновационных энерготехнологий, выполняется оценка общей эффективности и масштабов тиражирования этих технологий. При отрицательных результатах этой оценки технологии считаются неэффективными. В случае положительных результатов выполняется анализ коммерческой и бюджетной эффективности, предотвращённого экологического ущерба. Оценка коммерческой эффективности включает в себя идентификацию рисков освоения новых технологий, анализ чувствительности, определение границ безубыточности, определение ожидаемого интегрального эффекта от освоения технологии в рамках границ безубыточности. При положительном интегральном эффекте принимается решение о целесообразности проекта. В случае отрицательного интегрального эффекта выполняется оценка коммерческой эффективности с учётом возможных сторонних инвесторов. Если по результатам этой оценки даже с учётом инвесторов ожидаемый интегральный эффект остаётся отрицательным, то проект считается нецелесообразным.

Затраты на когенерационные установки определяются капитальными затратами (252 тыс. р.) и ежегодными расходами на поддержание работоспособного состояния (47 тыс. р.). Капитальные (единовременные) затраты на когенерационные установки определяются величиной затрат на заработную плату, затрат на материалы, накладных расходов, затрат на оборудование. Эксплуатационные затраты в данном случае определяются величиной затрат на текущий ремонт и воду. Столь низкие эксплуатационные затраты в первую очередь объясняются отсутствием топливной составляющей при условии административно-правового содействия в реализации программы замещения ДЭС когенерационными установками. В случае возникновения затрат на топливо ниже приведён соответствующий расчёт показателей. Ежегодные затраты на топливо для ДЭС мощностью 100 кВт (согласно [3]) составляют порядка 240 тыс. р. Из этого следует, что экономия на эксплуатационных затратах составляет 193 тыс. р. при работе одной установки мощностью 100 кВт при капитальных затратах 252 тыс. р.

На основе результатов по затратам определены показатели инвестиционной деятельности (табл. 2) в расчёте на 100 кВт установленной мощности. Здесь чистый дисконтированный доход (NPV) определяется разницей между экономией затрат (D_t) при внедрении когенерационных установок с учётом ставки дисконтирования ($i=10\%$) и первоначальных инвестиций (I_t), вложенных в производство установок. Чистый денежный поток формируется как разница между экономией на эксплуатационных затратах и капитальными затратами.

Таблица 2. Показатели инвестиционной деятельности, тыс. р.

Показатели	Обозн.	Сборка, год		Эксплуатация, год			
		0	1	2	3	5	
Инвестиции	I_t	252	–	–	–	–	
Чистый денежный поток	D_t	–	–59	134	327	738	
Чистый дисконтированный доход	NPV	–252	–54	111	246	458	

Чистый дисконтированный доход, рассчитанный по (1), показывает, что на втором году эксплуатации затраты полностью себя окупают и начинается экономия средств.

$$NPV = \sum_{t=1}^3 \frac{D_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^3 I_t. \quad (1)$$

При условии финансирования разработанного проекта из местного бюджета представленная выше экономия является показателем бюджетной эффективности. При этом происходит экономия эксплуатационных затрат, связанных с выработкой электрической энергии и заменой дизельных установок когенерационными установками. За 5 лет совокупная экономия (NPV) в расчёте на 100 кВт установленной мощности составит до 878 тыс. р. при среднегодовой экономии 146 тыс. р. с учётом капитальных вложений. Социальная эффективность внедрения когенерационных установок достигается за счёт снижения себестоимости вырабатываемой продукции – тепловой и электрической энергии и как следствие снижения отпускной цены. Говоря о потенциальной эффективности проекта по замещению всего парка ДЭС когенерационными установками на территории Томской области, можно констатировать, что экономия эксплуатационных затрат при суммарной установленной мощности в 50 тыс. кВт может достигать уровня 73 млн р./год.

Эксплуатационные затраты на когенерационные установки приведены исходя из цен 2013 г. Эксплуатационные затраты на ДЭС приведены исходя из стоимости дизельного топлива по состоянию на 2002 г. из источника [3]. Естественно, что затраты на дизельное топливо в 2013 г. были значительно выше, чем в 2002 г., соответственно можно рассчитывать на кратное увеличение экономии эксплуатационных затрат при переходе на выработку электрической энергии когенерационными установками суммарной установленной мощно-

стью 50 тыс. кВт для покрытия нужд изолированных районов Томской области.

Оценка коммерческой эффективности выполняется по методике [21], наиболее близко подходящей к тематике исследований, и включает в себя идентификацию технических, финансово-экономических, экологических и социальных рисков, что в целом позволяет определить вероятность наступления риска в целом. Технические риски определяются зависимостью использования технологии от качества энергоресурсов (низкосортное топливо), надёжностью и безопасностью внедряемой технологии низкотемпературной внутрицикловой конверсии, реальными объемами энергоресурсосбережения. Финансово-экономические риски определяются неустойчивостью объемов спроса, изменением в системе налогообложения, изменением штрафов по экологическим выбросам, ростом стоимости используемых низкосортных энергоресурсов. Экологические риски определяются величиной загрязнения окружающей среды при эксплуатации когенерационных установок, а также возможными последствиями от аварий, сопровождающихся вредными выбросами. Социальные риски определяются возможным ростом тарифов на производимую продукцию, отсутствием субсидий из государственного бюджета. Определение всех вышеперечисленных рисков позволило спрогнозировать величину совокупного риска (табл. 3) по внедрению когенерационных установок.

Таблица 3. Прогнозная величина совокупного риска

Наименование риска	Величина риска
Технические	0,07
Финансово-экономические	0,08
Экологические	0,12
Социальные	0,06
Совокупный риск	0,33

По результатам расчета видно, что вероятность наступления совокупного риска ниже среднего и ближе к критерию «скорее не наступит». Наибольшую величину представляют экологические риски, обусловленные важностью предотвращения наступления такого события. Технические риски обусловлены, прежде всего, надёжностью и безопасностью внедряемой технологии. Финансово-экономические риски в основном зависят от стоимости используемого сырья, а социальные риски всецело зависят от политики, проводимой местными властями.

Анализ чувствительности проекта по замещению действующего парка ДЭС на когенерационные установки проводится для оптимистического и пессимистического сценариев, связанных с изменением стоимости низкосортного топлива в диапазоне 0...300 р./т.н.т., и нормы дисконта (ставки доходности) 10...25 % в случае привлечения частных инвесторов. Таким образом, оптимистичный и пессимистичный сценарии характеризуются следующими показателями (табл. 4).

Таблица 4. Показатели сценариев

Сценарий	Предполагаемый диапазон изменения показателей	
	Цена топлива, р./т.н.т	Норма дисконта, %
Оптимистичный	0	10
Пессимистичный	300	25

При анализе чувствительности используется величина чистого дисконтированного дохода (NPV), вычисленная для оптимистичного (878 тыс. р.) и пессимистичного (353 тыс. р.) сценариев в расчёте на 100 кВт установленной мощности за 5 лет.

Согласно расчётам по пессимистичному сценарию, на втором году эксплуатации экономия топливной составляющей в денежном выражении составляет 65 тыс. р. для когенерационной установки мощностью 100 кВт. Потенциальная эффективность проекта по пессимистичному сценарию для суммарной установленной мощности 50 тыс. кВт в виде экономии эксплуатационных затрат в среднем за 1 год составляет 35,3 млн р./год.

С учетом существующей неопределённости в виде двух сценариев развития проекта оценка его эффективности в целом осуществляется посредством определения ожидаемого интегрального эффекта $\Delta_{\text{ож}}$, зависящего от наибольшего Δ_{max} и наименьшего Δ_{min} интегральных эффектов (NPV) по рассмотренным сценариям, с учётом норматива λ (согласно рекомендациям принято 0,3), отражающего предпочтения соответствующего хозяйствующего субъекта в условиях неопределённости:

$$\Delta_{\text{ож}} = \Delta_{\text{max}} \cdot \lambda + (1 - \lambda) \cdot \Delta_{\text{min}}$$

Значение ожидаемого интегрального эффекта от реализации проекта по замещению действующего парка ДЭС на когенерационные установки на территории Томской области в расчёте на 5 лет с учётом неопределённости составляет 255,25 млн

р. Таким образом, в условиях неопределённости реализация проекта по замещению действующего парка ДЭС на когенерационные установки представляется экономически целесообразной в случае привлечения инвестиций как из бюджетов различных уровней, так и частного капитала.

Выводы

1. Разработана новая конструкция когенерационной энергоустановки с топливным элементом на основе внутрицикловой конверсии органического сырья для автономного энергообеспечения (заявка на выдачу патента РФ на изобретение № 2013143097 от 23.09.2013).
2. Капитальные затраты на производство когенерационных установок превосходят стоимость существующих ДЭС, однако низкие эксплуатационные затраты, определяемые стоимостью топлива, приводят к быстрой окупаемости затрат.
3. Бюджетная эффективность проекта по замещению действующего парка ДЭС Томской области когенерационными установками определяется экономией затрат на топливную составляющую в процессе выработки электроэнергии, которая может достигать уровня 73 млн р./год.
4. Ожидаемый интегральный эффект от реализации проекта по замещению действующего парка ДЭС когенерационными установками на территории Томской области в течение 5 лет находится на уровне 255 млн р., что свидетельствует об экономической целесообразности тиражирования когенерационных установок.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы», ГК № 14.516.11.0078 от 27 июня 2013 г.), гранта РФФИ № 13–08–98070 и Госзадания на НИР № 2069 в 2014 году.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р // Российская газета, 25.01.2011.
2. Постановление Государственной Думы Томской области от 28.02.2008 № 1008 «Энергетическая стратегия Томской области на период до 2020 года» // Интерактивная коммуникационная площадка для государственных служащих «ГосБук» [2014–2014]. Дата обновления: 01.02.2014. URL: <http://www.gosbook.ru/node/31231> (дата обращения: 20.09.2013 г.).
3. Сергеев М.Н. Электроснабжение потребителей изолированных районов Томской области: состояние и перспектива / Энергоснабжение и энергетическая безопасность регионов России. III Всероссийское совещание: сб. докладов. – Томск: Изд-во ЦНТИ, 2002. – С. 30–38.
4. General Electric займется строительством объектов малой генерации для промышленных предприятий // Журнал Металлоснабжение и сбыт. 1995–2013. URL: <http://www.metalinfo.ru/ru/news/64626> (дата обращения: 20.09.2013).
5. Новосибирская область проведет модернизацию объектов ЖКХ с использованием технологий когенерации // Интернет-портал сообщества ТЭК. 2007–2013. URL: <http://energyland.info/news-show-tek-teplo-102014> (дата обращения: 21.06.2013).
6. Меморандум о создании и деятельности технологической платформы «Малая распределённая энергетика» // Интернет-портал ЗАО «Агентство по прогнозированию балансов в электроэнергетике» URL: http://www.eapbe.ru/distributed_energy/memo_TP_SDE.php (дата обращения: 24.07.2013).
7. Анализ эффективности современных промышленных технологий газификации угля / А.Ф. Рыжков, В.Е. Силин, А.В. Попов, Т.Ф. Богатова // Энергетик. – 2012. – № 10. – С. 22–25.
8. Перспективы применения гибридных энергоустановок на основе твёрдо-оксидных топливных элементов с внутрицикловой газификацией углей / Д.С. Безносова, Д.Г. Григорук, Д.А. Лялин, А.В. Туркин // Теплоэнергетика. – 2011. – № 9. – С. 63–66.
9. Молодков В.В., Исамухамедов Я.Ш., Баринев В.А. Состояние и перспективы развития в России нетрадиционной возобновляемой и децентрализованной энергетики // Энергетик. – 2012. – № 4. – С. 48–50.
10. Перспективные технологии использования биоводорода в энергоустановках на базе топливных элементов (обзор) / Д.О. Дуников, В.И. Борзенко, С.П. Малышенко, Д.В. Блинов, А.Н. Казаков // Теплоэнергетика. – 2013. – № 3. – С. 48–57.
11. Способ получения газа из твёрдого топлива: пат. 2321617 Рос. Федерация МПК C10J3/54; заявл. 18.12.2006; опубл. 10.04.2008. – 7 с.

12. Способ получения горючего газа, обогащённого водородом: пат. 2462503 Рос. Федерация МПК C10J3/02; заявл. 24.05.2011; опубл. 27.09.2012. – 6 с.
13. Исследование процесса генерации газа в автономных энергетических установках / А.С. Заворин, А.В. Казаков, А.А. Макеев и др. // Теплоэнергетика. – 2010. – № 1. – С. 74–78.
14. Способ получения топливных брикетов из низкосортного топлива: пат. 2458974 Рос. Федерация МПК C10L5/14, C10L5/28; заявл. 08.06.2011; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 4. – 7 с.
15. Способ изготовления топливных брикетов из биомассы: пат. 2484125 Рос. Федерация МПК C10L5/44; C10L5/14; C10L5/26; C10F7/06; заявл. 16.04.2012; опубл. 10.06.2013. – 7 с.
16. Заворин А.С., Казаков А.В., Табакаев Р.Б. Экспериментальные предпосылки к технологии производства топливных брикетов из торфа // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 18–22.
17. Когенерационная энергоустановка с топливным элементом на основе внутрициклового конверсии органического сырья: заявка на пат. 2013143097 Рос. Федерация МПК C10J3/00, C10J3/20, H01M8/06; заявл. 23.09.2013.
18. Модель когенерационной энергоустановки с топливным элементом на основе внутрициклового конверсии органического сырья для автономного энергообеспечения (методическое пособие по работе модели) / А.В. Казаков, А.С. Заворин, Р.Б. Табакаев, П.Ю. Новосельцев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 82 с.
19. Проект модуля блочной когенерационной энергоустановки с топливным элементом на основе внутрициклового конверсии органического сырья для автономного энергообеспечения: монография / А.В. Казаков, А.С. Заворин, Р.Б. Табакаев, П.Ю. Новосельцев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 191 с.
20. Казаков А.В. Термическая конверсия низкосортных топлив применительно к газогенерирующим установкам: дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ТПУ, 2002. – 158 с.
21. Зубова М.В. Инструменты оценки эффективности инвестиций в инновационные энерготехнологии: дис. ... канд. экон. наук. – Красноярск: СФУ, 2007. – 245 с.

Поступила 26.09.2013 г.

UDC 62–665.9

THE COGENERATION POWER PLANT WITH A FUEL CELL BASED ON INTRACYCLIC CONVERSION OF ORGANIC MATERIAL FOR OFF-LINE POWER SUPPLY

Aleksandr V. Kazakov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: kazakov@tpu.ru

Aleksandr S. Zavorin,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: zavorin@tpu.ru

Pavel Yu. Novoseltsev,

Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: pavel2906@rambler.ru

Roman B. Tabakaev,

Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: TabakaevRB@tpu.ru

The development of power plants for decentralized energy supply consumers is the current problem of research and it is confirmed by modern vectors of small power development. The aim of the work is the development and feasibility study of reclamation of innovative energy technologies for applying low-grade fuels in small power engineering in cogeneration plants with a fuel cell. The authors have used the experimental and theoretical research methods and have constructed the experimental model of a cogeneration power plant that allows you to check the function and to determine the characteristics of technical solutions cogeneration power plant. The experimental model was used for carrying out the researches; the calculation of the power plant construction is based on the results of the researches. The authors carried out technical and economic evaluation of the power plant by the design results.

The results of the research: the power plant construction was designed and feasibility study of its implementation advisability was proposed.

Conclusions: the new design of the cogeneration power plant was developed with a fuel cell based on intracyclic conversion of organic raw materials for independent power supply; capital costs on production of cogeneration plants exceed the cost of existing diesel power plant, but low operating costs, determined by fuel cost result in rapid payback. Budget effectiveness of the project for replacing the existing diesel power plant park by cogeneration plants is determined by fuel component savings when generating electricity, which can reach the level of 73 million rubles per year; the expected integral effect of the project for replacing the existing diesel power plant park by cogeneration plants in Tomsk region for 5 years is at the level of 255 million rubles, indicating the economic feasibility of replicating cogeneration plants.

Key words:

Cogeneration power plant, fuel cells, intracyclic conversion, organic material, off-line power supply.

REFERENCES

1. Rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 13.11.2009 g. № 1715-r [Government Directive]. *Rossiyskaya gazeta*, 25.01.2011.
2. *Energeticheskaya strategiya Tomskoy oblasti na period do 2020 goda* [Energy Strategy of Tomsk region until 2020]. Available at: <http://www.gosbook.ru/node/31231> (accessed 20 September 2013).
3. Sergeev M.N. Elektrosnabzhenie potrebiteley izolirovannykh rayonov Tomskoy oblasti: sostoyanie i perspektiva [Electricity consumers in isolated areas of Tomsk region: state and prospects]. *Trudy III Vserossiyskogo soveshchaniya. Energosnabzhenie i energeticheskaya bezopasnost regionov Rossii* [Proc. 3rd Russia meeting. Energy supply and energy security of Russian regions]. Tomsk, 2002, pp. 30–38.
4. *General Electric zaymetsya stroitelstvom obektov maloy generatsii dlya promyshlennykh predpriyatiy* [General Electric will build small generation facilities for industrial enterprises]. Available at: <http://www.metalinfo.ru/ru/news/64626> (accessed 24 July 2013).
5. *Novosibirskaya oblast provedet modernizatsiyu obektov ZHKH s ispolzovaniem tekhnologiy kogeneratsii* [Novosibirsk region will upgrade housing and communal services using cogeneration technologies]. Available at: <http://energyland.info/news-show-tek-teplo-102014> (accessed 21 June 2013).
6. *Memorandum o sozdanii i deyatelnosti tekhnologicheskoy platformy «Malaya raspredelennaya energetika»* [Memorandum on the establishment and operation of the technological platform «Small distributed power»]. Available at: http://www.eapbe.ru/distributed_energy/memo_TP_SDE.php (accessed 24 July 2013).
7. Ryzhkov A.F., Silin V.E., Popov A.V., Bogatova T.F. Analiz effektivnosti sovremennykh promyshlennykh tekhnologiy gazifikatsii uglya [Analysis of the effectiveness of modern industrial coal gasification technology]. *Energetik*, 2012, no. 10, pp. 22–25.
8. Beznosova D.S., Grigoryuk D.G., Lyalin D.A., Turkin A.V. Perspektivy primeneniya gibridnykh energoustanovok na osnove tverdo-oksidnykh toplivnykh elementov s vnutritsiklovoy gazifikatsiyey ugley [Prospects of application of hybrid power plants based on solid oxide fuel cells with gasification of coal]. *Thermal Engineering*, 2011, no. 9, pp. 63–66.
9. Molodyuk V.V., Isamukhamedov Ya.Sh., Barinov V.A. Sostoyanie i perspektivy razvitiya v Rossii netraditsionnoy vozobnovlyemoy i detsentralizovannoy energetiki [Status and prospects of Russia's non-traditional renewable and decentralized energy]. *Energetik*, 2012, no. 4, pp. 48–50.
10. Dunikov D.O., Borzenko V.I., Malysenko S.P., Blinov D.V., Kazakov A.N. Perspektivnye tekhnologii ispolzovaniya biovodoroda v energoustanovkakh na baze toplivnykh elementov (obzor) [Biohydrogen promising technologies in power plants based on fuel cells (review)]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 2013, no. 3, pp. 48–57.
11. Zavorin A.S., Makeev A.A., Kazakov A.V. *Sposob polucheniya gaza iz tverdogo topliva* [A method of producing gas from solid fuel]. Patent RF, no. 2321617, 2008.
12. Zavorin A.S., Kazakov A.V., Tabakaev R.B. *Sposob polucheniya goryuchego gaza, obogashchennogo vodorodom* [A method for producing a fuel gas rich in hydrogen]. Patent RF, no. 2462503, 2012.
13. Zavorin A.S., Kazakov A.V., Makeev A.A. Issledovanie protsessa generatsii gaza v avtonomnykh energeticheskikh ustanovkakh [Investigation of the process of gas generation in autonomous power plants]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 2010, no. 1, pp. 74–78.
14. Zavorin A.S., Kazakov A.V., Tabakaev R.B. *Sposob polucheniya toplivnykh briketov iz nizkosortnogo topliva* [A method for producing fuel pellets of a low-consumption]. Patent RF, no. 2458974, 2012.
15. Zavorin A.S., Kazakov A.V., Tabakaev R.B. *Sposob izgotovleniya toplivnykh briketov iz biomassy* [A method of manufacturing fuel pellets from biomass]. Patent RF, no. 2484125, 2013.
16. Zavorin A.S., Kazakov A.V., Tabakaev R.B. Eksperimentalnye predposylki k tekhnologii proizvodstva toplivnykh briketov iz torfa [Experimental prerequisites to producing fuel briquettes from peat]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 4, pp. 18–22.
17. *Kogeneratsionnaya energoustanovka s toplivnym elementom na osnove vnutritsiklovoy konversii organicheskogo syrya* [Cogeneration power plant with a fuel cell based on organic raw conversion intracyclic]. Zayavka na patent RF, no. 2013143097, 2013.
18. Kazakov A.V., Zavorin A.S., Tabakaev R.B., Novoseltsev P.Yu. *Model kogeneratsionnoy energoustanovki s toplivnym elementom na osnove vnutritsiklovoy konversii organicheskogo syrya dlya avtonomnogo energoobespecheniya (metodicheskoe posobie po rabote modeli)* [Model of cogeneration power plant with a fuel cell based on intracyclic conversion of organic raw materials for autonomous power supply (handbook on model operation)]. Tomsk, TPU Publ., 2013. 82 p.
19. Kazakov A.V., Zavorin A.S., Tabakaev R.B., Novoseltsev P.Yu. *Proekt modulya blochnoy kogeneratsionnoy energoustanovki s toplivnym elementom na osnove vnutritsiklovoy konversii organicheskogo syrya dlya avtonomnogo energoobespecheniya: monografiya* [Project of a module of block cogeneration power plant with a fuel cell based on intracyclic conversion of organic raw materials for autonomous power supply: Monograph]. Tomsk, TPU Publ., 2013. 191 p.
20. Kazakov A.V. *Termicheskaya konversiya nizkosortnykh topliv primenitelno k gazogeneriruyushchim ustanovkam*. Kand. Diss. [Thermal conversion of low-grade fuels in relation to gas generating devices. Cand. diss.]. Tomsk, 2002. 158 p.
21. Zubova M.V. *Instrumenty otsenki effektivnosti investitsiy v innovatsionnye energotekhnologii*. Kand. Diss. [Tools for assessment of efficiency of investments in innovative energy technologies. Cand. diss.]. Krasnoyarsk, 2007. 245 p.