

На правах рукописи



Нгуен Дык Тоан

**ИНТЕГРАЦИЯ ОБЪЕКТОВ МАЛОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
В ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ**

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», на кафедре «Энергетическое машиностроение»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Мингалеева Гузель Рашидовна

Официальные оппоненты: **Очков Валерий Федорович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор кафедры Теоретических основ теплотехники им. М.П. Вукаловича

Вдовенко Иван Анатольевич
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», доцент кафедры «Тепловая и атомная энергетика имени А.И. Андрющенко»

Ведущая организация: ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск

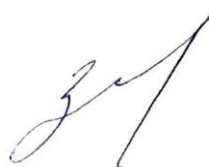
Защита состоится «23» марта 2021 г., в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.082.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-224, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.06.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/273?idDiss=112>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ш.Г. Зиганшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Надежное энергоснабжение промышленных предприятий и жилищных комплексов не всегда может быть обеспечено от централизованной энергосистемы, особенно в труднодоступных районах. В некоторых случаях более рациональным является строительство автономной электростанции. Однако при этом должен быть обоснован выбор топлива, на котором она будет работать, или других видов энергоресурсов. Перспективным является использование возобновляемых источников – энергии солнца, ветра, приливов и биомассы. Однако их особенностью является выраженный переменный характер. Постоянное надежное энергоснабжение в этом случае может быть достигнуто за счет комбинации традиционных и возобновляемых энергоресурсов. Разработка технологических схем подобных объектов и обоснование выбора типа схемы является в настоящее время актуальной задачей.

Тема диссертационной работы соответствует приоритетному направлению развития науки в Российской Федерации (указ Президента РФ № 899 от 7 июня 2011 г.) «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а также критическим технологиям «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе», также перспективным направлениям научно-технологического развития Республики Вьетнам.

Степень разработанности темы

В то время как ископаемые энергетические ресурсы истощаются, экологические ограничения усиливаются во всем мире, и возникает необходимость разработки новых и усовершенствования известных методов энергосбережения и производства чистой энергии, которые в то же время все еще отвечают требованиям надежности энергоснабжения. Вьетнам не выходит за рамки общей тенденции мира.

Анализ особенностей энергосистемы Вьетнама был проведен в работах Phuong Anh Nguyen, Malcolm Abbott, Thanh Loan T. Nguyen, а исследования посвященные обоснованию использования возобновляемых источников энергии – в работах Nhan T. Nguyen, Minh Ha-Duong, J. Polo, A. Bernardos, A.A. Navarro, моделирование технологических схем электростанций, совмещающих различные источники энергии, в том числе возобновляемые (солнечную, ветровую) в статьях Очкова В.Ф., Yao M. Seshiea, Kokouvi Edem N' Tsoukroea, Pierre Neveu, Yézouma Coulibaly, Yao K. Azoumah, Marco Gambini, Michela Vellini и многих других ученых из различных стран мира. Однако, несмотря на известные разработки, не проводилась оценка эффективности внедрения объектов малой энергетики в энергетическую систему Республики Вьетнам, в том числе с использованием возобновляемых источников энергии.

Цель диссертационной работы - разработка научных основ интеграции объектов малой распределенной генерации, использующих традиционное топливо и возобновляемые энергетические ресурсы, в энергетическую систему Республики Вьетнам.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- выполнить анализ перспектив внедрения объектов малой распределенной генерации в энергетическую систему Республики Вьетнам;
- выполнить анализ параметров работы оборудования малой мощности для производства энергии на основе традиционных и возобновляемых энергоресурсов;
- провести математическое моделирование технологической схемы гибридной мини-ТЭС и определить оптимальные режимные параметры;
- разработать методику расчета технологических схем мини-ТЭС, использующих различные виды энергетических ресурсов, и обосновать выбор типа схемы;
- разработать модель интеграции объектов малой распределенной генерации, использующих различные виды энергетических ресурсов, в энергетическую систему Республики Вьетнам.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана обобщенная методика выбора типа технологической схемы мини-ТЭС и ее расчета на основе использования традиционных и возобновляемых энергетических ресурсов;
- разработана модель интеграции объектов малой распределенной генерации в энергетическую систему Республики Вьетнам;
- проведена оценка повышения экономичности сегмента малой распределенной генерации при использовании солнечной энергии.

Практическая значимость заключается в разработке технологической схемы производства энергии на основе комбинирования традиционных и возобновляемых энергоресурсов; методике расчета и оценки эффективности технологических схем малых автономных электростанций, работающих на традиционных и возобновляемых энергоресурсах, и в оценке экономии топливно-энергетических ресурсов при внедрении объектов малой распределенной генерации в энергетическую систему Республики Вьетнам.

Теоретическая значимость. Разработанная математическая модель технологической схемы гибридной мини-ТЭС может использоваться для исследования влияния интенсивности солнечного излучения на эффективность объекта и выбор рациональных режимных параметров.

Степень достоверности полученных результатов численных исследований подтверждается применением основных законов термодинамики, тепломассообмена, актуальных сертифицированных программ и вычислительных алгоритмов, а также сравнением результатов расчета с известными данными, опубликованными в научной литературе.

Методология и методы исследования. С целью решения поставленных задач был применен системный подход и методы эксергетического и термоэкономического анализа, нормативные методики расчета основного энергогенерирующего оборудования.

Личный вклад автора. Автором определены перспективы внедрения объектов малой распределенной генерации в энергетическую систему Республики Вьетнам; выполнен анализ параметров работы оборудования малой мощности для производства энергии на основе традиционных и возобновляемых энергоресурсов; разработана математическая модель технологической схемы гибридной мини-ТЭС и определены оптимальные режимные параметры; разработана методика расчета технологических схем мини-ТЭС, использующих различные виды энергетических ресурсов; разработана модель интеграции объектов малой распределенной генерации, использующих различные виды энергетических ресурсов в энергетическую систему Республики Вьетнам.

На защиту выносятся следующие положения.

- 1) Математическая модель технологической схемы гибридной мини-ТЭС с использованием традиционных и возобновляемых энергетических ресурсов.
- 2) Обобщенная методика выбора типа технологической схемы мини-ТЭС и ее расчета на основе использования традиционных и возобновляемых энергетических ресурсов.
- 3) Модель интеграции объектов малой распределенной генерации в энергетическую систему Республики Вьетнам.
- 4) Результаты оценки повышения экономичности сегмента малой распределенной генерации при использовании солнечной энергии.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных и общероссийских конференциях, в том числе на XII и XIII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2017 г. и 2018 г.); XXI Аспирантско-магистерском научном семинаре, посвященном Дню энергетика Казань, ФГБОУ ВО КГЭУ, (Казань, 2017 г.); International Scientific and Technical Conference - SES, (Казань, 2019 г.); Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве, (Казань, 2019 г.).

Публикации. Основное содержание работы изложено в 9 публикациях, в том числе 3 статьи в журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus и Web of Science, 2 статьи в журналах из перечня ВАК, 4 – в материалах всероссийских и международных конференций.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует специальности 05.14.01 «Энергетические системы и комплексы» и относится к следующим областям исследования:

1) математическая модель технологической схемы гибридной мини-ТЭС и обобщенная методика выбора типа технологической схемы мини-ТЭС и ее расчета на основе использования традиционных и возобновляемых энергетических ресурсов соответствует п.2 «Исследование и разработка нетрадиционных источников энергии и новых технологий преобразования энергии в энергетических системах и комплексах»;

2) модель интеграции объектов малой распределенной генерации в энергетическую систему Республики Вьетнам и результаты оценки повышения экономичности сегмента малой распределенной генерации при использовании солнечной энергии соответствуют п.5 «Разработка и исследование в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, при транспортировке теплоты и энергоносителей в энергетических системах и комплексах» и п.1 «Разработка научных основ исследования общих свойств, создания и принципов функционирования энергетических систем и комплексов, фундаментальные и прикладные системные исследования проблем развития энергетики городов, регионов и государства, топливно-энергетического комплекса страны».

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 112 наименований. Текст диссертации изложен на 167 страницах машинописного текста, включающих 41 иллюстрацию, 22 таблицы и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цели, задачи, сформулирована научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе представлены тенденции развития малой распределенной энергетики в мире, в России и в Республике Вьетнам. Описан опыт и перспективы использования гибридных электростанций различного типа, сочетающих традиционное твердое, жидкое и газообразное ископаемое топливо и солнечную, ветровую энергию или энергию биомассы. Выявлены проблемы, возникающие при комбинировании различных источников. Предложена классификация мини-ТЭС по основному признаку – типу используемых первичных ресурсов. Выявлено, что для малых энергетических объектов, которые могут быть размещены на территории Вьетнама целесообразно использование угля, газа и солнечной энергии в связи с их доступностью и значительным потенциалом для использования в гибридных технологических схемах объектов малой распределенной энергетики. Рассмотрена энергетическая система Республики Вьетнам и перспективы ее развития до 2030 г.

К концу 2020 года во Вьетнаме будет более 250 электростанций общей мощностью 54881 МВт, а общая протяженность линий 500 кВ составит 3829 км. Наличие малых электростанций, подключенных к энергосистеме или автономных, в настоящее время не учитывается. Наибольшую долю в выработке электроэнергии составляют тепловые электростанции, работающие на угле (58%), нефтяное и газовое топливо сжигают 17% станций, гидроэлектростанции составляют 18%, ВИЭ всего 5%, 2% - импорт электроэнергии из Китая и Лаоса. Таким образом, перспективным является дальнейшее использование угля, газа и солнечной энергии, в том числе и в малой распределенной энергетике.

Во второй главе проведено исследование технологических схем тех типов, внедрение которых целесообразно в связи с доступностью первичных ресурсов – паротурбинных угольных и газотурбинных мини-ТЭС мощностью до 25 МВт. На основе уравнений материального и энергетического балансов рассчитывается количество используемого топлива и эксергетическая эффективность для каждого типа установки. В качестве критериев

эффективности выбраны эксергетический КПД и удельный расход топлива. Для паротурбинных мини-ТЭС мощностью от 6 до 25 МВт, работающих на угле, эксергетический КПД определялся как для отдельных элементов, так и для мини-ТЭС в целом.

Для сушильно-мельничной установки эксергетический КПД определялся по формуле:

$$\eta_{с.м} = \frac{E_y'' + E_{исп} + E_{с.а}''}{E_{с.а}' + \sum_{i=1}^n L_i + E_y' + E_{мех}}, \quad (1)$$

где L_i – электрическая мощность, затрачиваемая на оборудование для сушки и измельчения; n – количество аппаратов, имеющих электрический привод; $E_{исп}$ – эксергия, затрачиваемая на испарение влаги из угля; $E_{с.а}'$, $E_{с.а}''$ – эксергия сушильного агента на входе и на выходе из мельницы, E_y' , E_y'' – эксергия угля, поступающего в мельницу, и измельченного угля, $E_{мех}$ – эксергия теплоты, выделяющейся при измельчении угля.

Для парового котла данный показатель рассчитывался следующим образом:

$$\eta_{п.к} = \frac{E_{п}''}{E_{п.с}' + E_{п.в}''}, \quad (2)$$

где $E_{п.в}''$ – эксергия питательной воды, поступающей в котел-утилизатор; $E_{п}''$ – эксергия пара, образующегося в котле-утилизаторе; $E_{п.с}'$ – эксергия продуктов сгорания, поступающих в котел-утилизатор.

Эффективность работы паровой турбины оценивалась следующим образом:

$$\eta_{п.т} = \frac{N_э + E_{п.т}''}{E_{п}'' + \sum_{i=1}^m L_i}, \quad (3)$$

где $N_э$ – электрическая мощность, вырабатываемая электрогенератором паровой турбины; $E_{п.т}''$ – эксергия пара, направляемого на теплофикацию; $E_{п}''$ – эксергия пара, поступающего на паровую турбину от котла-утилизатора; L_i – электрическая мощность, затрачиваемая на вспомогательное оборудование; m – количество единиц вспомогательного оборудования паровой турбины, имеющего электрический привод.

Эксергетический КПД всей станции определяется по общей формуле:

$$\eta_{мини-ТЭС} = \frac{N_э + E_{п.т}''}{E_y' + \sum_{i=1}^k L_i + E_{с.а}' + E_{п.в}' + E_{мех}}, \quad (4)$$

где k – общее количество единиц вспомогательного оборудования мини-ТЭС, имеющего электрический привод. Остальные обозначения в формуле (4) такие же, как в формулах (1)–(3).

Результаты подбора основного оборудования паротурбинных мини-ТЭС и расчет показателей эффективности представлен в таблицах 1 и 2. Расчет проводился для Кузнецкого угля марки Т, добываемого в России, и угля марки 4б месторождения Вьетнама. Зольность угля марки 4б A^p составляет 24%, влажность 6%, низшая теплота сгорания на рабочую массу 25330 кДж/кг. Анализ представленных результатов показывает, что эффективность котлов различной мощности находится примерно на уровне 48% за исключением котла КЕ 25-14-225С. Эксергетические КПД паровых турбин малой мощности существенно различаются. Наибольшее значение 79,7% соответствует турбине П-6-1.2/0.5 мощностью 6 МВт. Турбины мощностью 11 и 12 МВт обладают меньшей эффективностью – 44,5 и 46,9 % соответственно. Также низкое значение КПД у углеразмольных мельниц ММТ 1300/2300/735 и ШБМ 250/390, которые выбраны для мини ТЭС мощностью 12 и 20 МВт соответственно.

Таблица 1. Показатели эффективности основного оборудования паротурбинных мини-ТЭС малой мощности

№	Электрическая мощность мини-ТЭС, МВт	Марка котла	Эксергетический КПД котла $\eta_{п.к.}$, % для угля марки		Марка паровой турбины	Эксергетический КПД турбины $\eta_{п.т.}$, % для угля марки		Марка углераз-мольной мельницы	Эксергетический КПД сушильно-мельничной установки, $\eta_{с.м.}$, % для угля марки	
			Т	4б		Т	4б		Т	4б
1	6	КЕ 25-14-225С	42,1	41,9	П-6-1.2/0.5	79,7	79,6	ММТ 1000/710/980	27,88	26,4
2	11,4	Е 65-3.9-440 КТ	48,2	48,0	К 11-1. (КТЗ)	44,5	44,5	ШБМ 220/330	27,07	25,7
3	12	КЕ 65-3.9-440 КТ	48,2	47,9	К 12-4.2	46,9	47,0	ММТ 1300/2300/735	24,74	23,6
4	20	Е 75-3.9-440 КТ	48,3	47,9	ПТГ-20	67,5	67,8	ШБМ 250/390	24,26	23,3
5	25	Е 90-3.9-440 КТ	47,7	47,9	ПТГ-30	70,4	70,7	ММТ 1300/2030/735	28,68	27,1

Таблица 2. Показатели эффективности паротурбинных мини-ТЭС малой мощности

№	Электрическая мощность мини-ТЭС, МВт	Расход угля, кг/с		Эксергетический КПД мини-ТЭС, %		Удельный расход угля, г/МВт		Удельный расход угля, г у.т./МВт	
		Т	4б	Т	4б	Т	4б	Т	4б
1	6	0,757	0,693	33,6	33,1	454,2	415,8	355,6	361,0
2	11,4	2,25	2,056	21,3	21,2	710,5	649,3	556,3	561,3
3	12	2,246	2,054	22,4	22,4	673,8	616,2	527,6	532,7
4	20	2,6	2,372	32,3	32,3	468,0	426,9	366,4	369,1
5	25	3,112	2,847	33,7	33,6	448,1	409,9	350,9	354,4

При расчете газотурбинных мини-ТЭС рассматривалась схема с разомкнутым циклом и диапазоном мощности от 1,2 до 15,2 МВт. Общая эффективность мини-ТЭС определялась по формуле аналогичной (4), расход газообразного топлива по зависимости:

$$B_{ГТ} = \frac{G_{КС}(h_{Н.Т} - h_{К.К})}{Q_i^Г + h_{Т.П} - h_{Н.Т}}, \quad (5)$$

где $G_{КС}$ - расход воздуха после компрессора, поступающего в КС, кг/с; $h_{К.К}$, $h_{Т.П}$, $h_{Н.Т}$ - энтальпии, кДж/кг, соответственно сжатого воздуха за компрессором, подогретого топлива и газов на входе в газовую турбину; $Q_i^Г$ - теплота сгорания газообразного топлива, кДж/кг.

Результаты расчета газотурбинных мини-ТЭС и подбора оборудования для комплектации схемы представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Основное оборудование для газотурбинных мини-ТЭС малой мощности

№ схемы	Компрессор	Температура на входе в турбину, °С	Температура на выходе из турбины, °С	Газовая турбина
1	П=13,6МПа	$T_{вх}=1112$	$T_{вых}=524$	ГТЭ-1.5, P=1.2 МВт
2	П=12МПа	$T_{вх}=950$	$T_{вых}=435$	ГТЭ-2.5, P=2.85 МВт
3	П=16,6МПа	$T_{вх}=1000$	$T_{вых}=420$	ГТГ- 6, P=6.7 МВт
4	П=11МПа	$T_{вх}=947$	$T_{вых}=435$	НК-14Э, P=8.6 МВт
5	П=11,5 МПа	$T_{вх}=920$	$T_{вых}=420$	ГТЭ-16, P=15.2 МВт

Результаты расчетов показали, что КПД тепловых электростанций малой мощности до 25 МВт в среднем гораздо ниже, чем для более мощных станций, поэтому необходимо реализовать энерго- и ресурсосберегающие мероприятия, например усовершенствовать схему с ГТУ, как более эффективную, используя солнечную энергию для подогрева поступающего в камеру сгорания воздуха.

Таблица 4. Показатели эффективности газотурбинных мини-ТЭС малой мощности

№	Электрическая мощность мини-ТЭС, МВт	Расход топлива, кг/с	Эксергетический КПД мини-ТЭС, %	Удельный расход топлива, г/кВт·ч	Удельный расход условного топлива, г у.т./ кВт·ч
1	1,2	0,074	31,3	222,4	369,4
2	2,85	0,195	28,2	246,3	409,8
3	6,7	0,45	28,6	241,8	402,3
4	8,6	0,547	30,2	229,0	381,0
5	15,2	1,041	28,1	246,6	410,2

В третьей главе рассматривается принципиальная схема гибридной мини-ТЭС, работающей на основе газотурбинной установки, в которой сжигается природный газ, а воздух, поступающий из компрессора, нагревается в солнечном воздушном нагревателе. Воздух после прохождения через компрессор частично попадает в воздушный нагреватель, расположенный на башне. Здесь он получает тепло от солнечного излучения, затем нагретый воздух смешивается с оставшимся воздухом. Газовая смесь подается в камеру сгорания для сжигания топлива и получения газов заданной температуры. Продукты сгорания направляются в газовую турбину для выработки электроэнергии.

Схема гибридной мини-ТЭС, а также обозначения массовых расходов рабочих сред, энтальпии и давления соответственно (m , h , P) представлена на рис. 1. Для расчета режимных параметров процесса производства энергии на данном объекте разработана математическая модель, включающая алгебраические уравнения материального и энергетического баланса для каждого этапа преобразования энергии.

Процесс сжатия воздуха в компрессоре характеризуется потреблением электрической энергии, вырабатываемой посредством газовой турбины:

$$m_1 h_1 + E_1 = m_2 h_2, \quad (6)$$

где m_1 , m_2 – массовый расход воздуха на входе в компрессор и на выходе из него соответственно, кг/с; h_1 ; h_2 – энтальпия воздуха на входе в компрессор и на выходе из него соответственно, кДж/кг.

Часть воздуха, сжатого в компрессоре, направляется в солнечный воздушный нагреватель, расположенный на башне и представляющий собой теплообменник с пористой вставкой (абсорбером), внутренняя поверхность которого нагревается за счет концентрированного солнечного излучения от гелиостатов, расположенных в непосредственной близости от станции. Энергетический баланс данного устройства описывается уравнением:

$$m_{21} h_2 + Q_2 = m_{21} h_3, \quad (7)$$

где m_{21} – массовый расход воздуха на входе в солнечный воздушный нагреватель и на выходе из него, кг/с; h_2 , h_3 – энтальпия воздуха на входе в солнечный воздушный нагреватель и на выходе из него соответственно, кДж/кг; Q_2 – энергия солнечного излучения, затраченная на нагрев воздуха m_{21} , кДж.

Для определения Q_2 используются следующие зависимости. Общая тепловая мощность солнечного приемника $Q_{\text{общ}}$ определяется как сумма полезно использованной тепловой мощности Q_2 и потерь $Q_{\text{пот}}$:

$$Q_{\text{общ}} = Q_2 + Q_{\text{пот}}, \quad (8)$$

где $Q_{\text{общ}}$ определяется в зависимости от параметров концентратора солнечной энергии. После концентрации интенсивность излучения увеличивается до I_r . Оптические и геометрические отношения концентрации связаны с оптической эффективностью η_{opt} системы концентратора:

$$Q_{\text{общ}} = A_r \alpha_r I_r = A_r \alpha_r \eta_{\text{opt}} CR_g I_b, \quad (9)$$

В формуле (9) коэффициент концентрации определяется как:

$$CR_g = \frac{A_a}{A_r}, \quad (10)$$

где A_a – площадь апертуры коллектора; A_r – площадь приемной поверхности; α_r – поглотительная способность поверхности; η_{opt} – оптическая эффективность; I_b – интенсивность солнечного излучения.

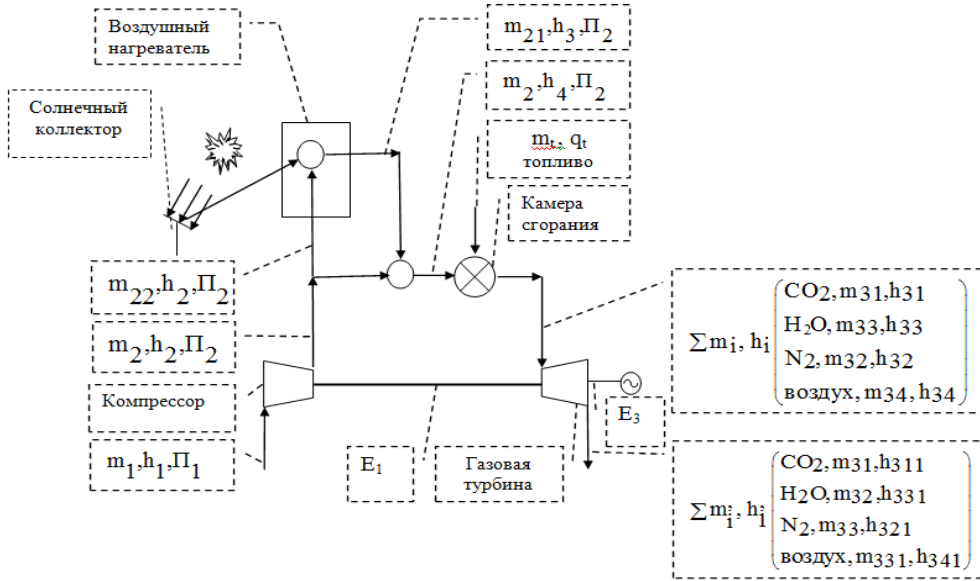


Рис. 1. Принципиальная схема гибридной мини-ТЭС с солнечным воздушным нагревателем

Потери определяются температурой приемника T_r и излучательной способностью ε_r поверхности приемника, в то время как общий коэффициент конвекции U_{nom} используется для учета потерь на конвекцию при температуре окружающей среды T_a :

$$Q_{nom} = A_r \varepsilon_r (T_r^4 - T_a^4) + U_{nom} (T_r - T_a), \quad (11)$$

Термический КПД η_r приемника и коллектора рассчитывается с использованием выражения:

$$\eta_r = \frac{Q_2}{A_a I_a} = \eta_{opt} \alpha - \frac{\varepsilon_r \sigma (T_r^4 - T_a^4) - U_{nom} (T_r - T_a)}{CR_g I_b}, \quad (12)$$

Воздух, нагретый за счет солнечного излучения, и воздух, поступающий напрямую из компрессора, смешиваются перед подачей в камеру сгорания. Энтальпия смеси определяется на основе следующего баланса:

$$m_2 h_4 = m_{21} h_3 + m_{22} h_2, \quad (13)$$

где m_{22} – массовый расход оставшегося воздуха, выходящего из компрессора, кг/с; h_4 – энтальпия воздушной смеси, кДж/кг; m_2 – массовый расход воздушной смеси, кг/с. Величины m_{21} и m_{22} связаны между собой соотношениями:

$$m_{21} = \varphi m_2; \quad m_{22} = (1 - \varphi) m_2; \quad (14)$$

где φ – доля воздуха, направляемого в воздушный нагреватель.

Энергетический баланс камеры сгорания выражается зависимостью:

$$m_T h_4 + m_T Q_n = m_{31} h_{31} + m_{32} h_{32} + m_{33} h_{33} + m_{34} h_{34} = \sum m_i h_i, \quad (15)$$

где m_T – массовый расход топлива, кг/с; h_{31} – энтальпия CO_2 , выходящего из камеры сгорания, кДж/кг; h_{32} – энтальпия N_2 , выходящего из камеры сгорания, кДж/кг; h_{33} – энтальпия H_2O , выходящего из камеры сгорания, кДж/кг; h_{34} – энтальпия избыточного воздуха, выходящего из камеры сгорания, кДж/кг; Q_n – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

Работа газовой турбины характеризуется следующим балансом:

$$m_{31} h_{31} + m_{32} h_{32} + m_{33} h_{33} + m_{34} h_{34} = E_1 + E_3 + m_{31} h_{311} + m_{32} h_{321} + m_{33} h_{331} + m_{34} h_{341}, \quad (16)$$

где m_{341} – массовый расход воздуха после турбины, кг/с; ; h_{311} – энтальпия CO_2 на выходе из турбины, кДж/кг; h_{321} – энтальпия N_2 на выходе из турбины, кДж/кг; h_{331} – энтальпия H_2O на выходе из турбины, кДж/кг; h_{341} – энтальпия воздуха на выходе из турбины, кДж/кг.

С использованием разработанной модели были рассчитаны мини-ТЭС мощностью 4,6 и 11,86 МВт, для которых имеются данные по эксплуатации, позволяющие проверить адекватность модели. В качестве примера расчета представлено изменение расходных характеристик при изменении интенсивности прямого солнечного излучения, а также при изменении температуры воздуха, для провинции Нинь Туан Республики Вьетнам (табл. 5).

Полученные данные показывают, что при изменении DNI от 0 до 745,98 кВт/м² расход топлива для мини-ТЭС мощностью 4,6 МВт снижается на 57,2%, а для мини-ТЭС мощностью 11,86 МВт – на 55,5%. Расчеты, выполненные для годового цикла работы, показывают снижение расхода топлива для климатических условий данной провинции на 7,1 и 5,3% соответственно.

Таблица 5. Расход топлива и воздуха при изменении интенсивности солнечного излучения

Время (GM+7) 01.01.2017	Интенсивность солнечного излучения DNI, Вт/м ²	Мощность 4,6 МВт		Мощность 11,86 МВт	
		Расход топлива m_T , г/с/(г у.т./с)	Расход воздуха m_1 , кг/с	Расход топлива m_T , г/с/(г у.т./с)	Расход воздуха m_1 , кг/с
1:00	0	152/270	8,714	263/467	18,318
3:00	3,29	151/268	8,715	263/467	18,320
5:00	146,97	135/240	8,759	234/415	18,387
7:00	381,98	107/190	8,831	186/330	18,495
9:00	440,01	100/177	8,849	175/311	18,521
11:00	594,94	82/146	8,896	145/257	18,590
12:20	745,98	65/115	8,941	117/208	18,655

Диаграммы для годового цикла работы данных станций в условиях провинции Нинь Туан Республики Вьетнам показаны на рис. 2. Суммарный расход топлива за 1 год установки мощностью 4,6 МВт составляет 7500 т/год. Экономия топлива за год составила 573,2 тонны или 278,5 тыс. долларов. Для установки мощностью 11,86 МВт годовой расход топлива составляет 21502 т/год, экономия – 1203,4 тонны или 584,7 тыс. долларов США.

На основе анализа зависимостей, которые использовались для расчета мини-ТЭС различной комплектации, была сформирована обобщенная методика выбора типа технологической схемы и ее расчета, алгоритм которой представлен на рис. 3.

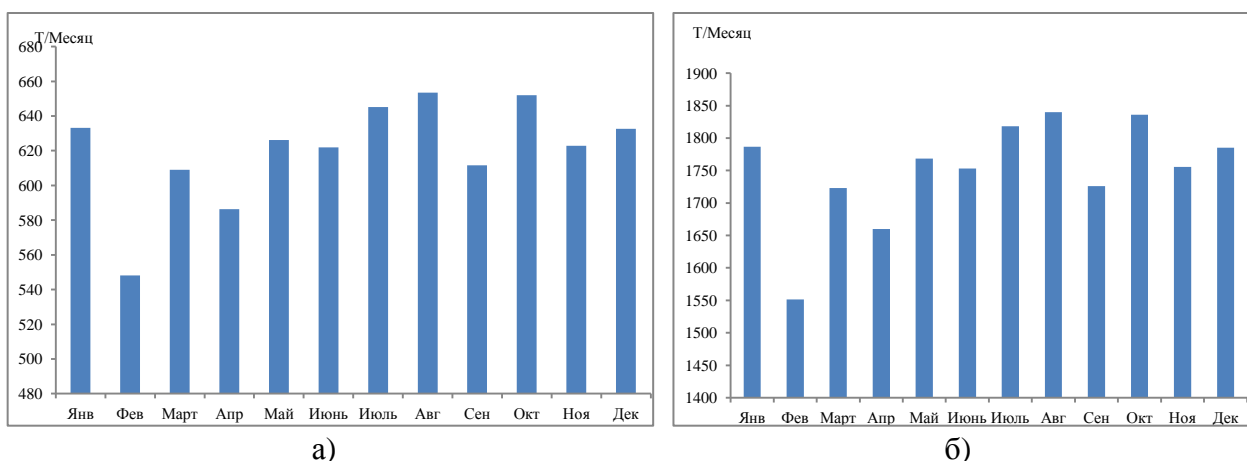


Рис. 2. Расход топлива (природного газа) по месяцам для гибридных мини-ТЭС а) мощностью 4,6 МВт и б) мощностью 11,86 МВт

Тип технологической схемы прежде всего определяется тем видом топлива, который доступен в данном регионе или стране, и использование которого наиболее целесообразно. Для Республики Вьетнам в качестве топлива в основном может использоваться уголь,

месторождения которого расположены в северной части страны, и природный газ, который добывается в шельфовой зоне или закупается в сжиженном виде и поставляется морским транспортом на побережье.

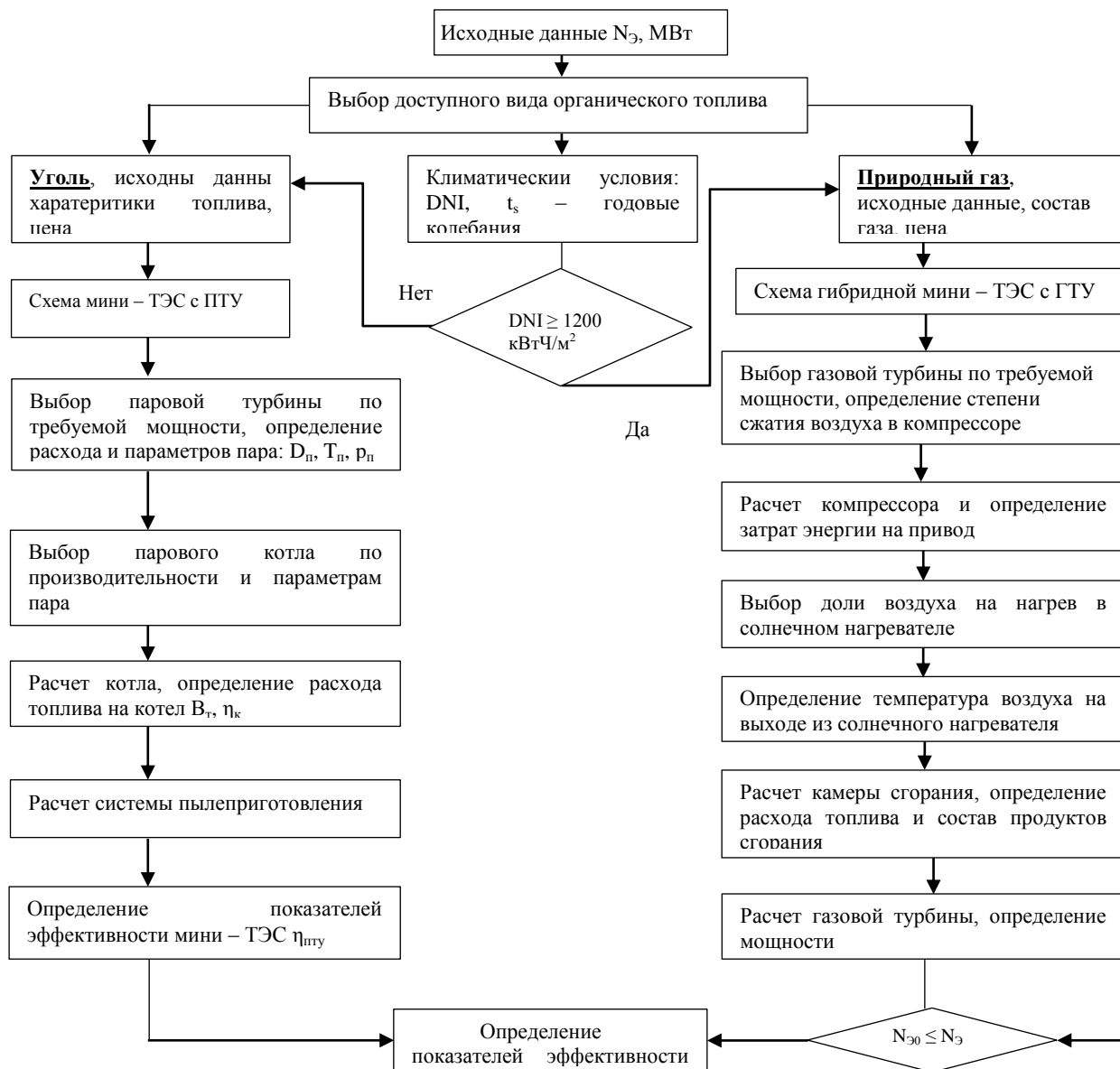


Рис. 3. Алгоритм обобщенной методики выбора типа технологической схемы мини-ТЭС и ее расчета

Однако технологические схемы на основе ГТУ в связи с жарким климатом данного государства имеют низкую эффективность, поэтому могут использоваться именно как гибридные. Такие схемы целесообразно использовать при интенсивности прямого солнечного излучения более $1200 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. После того, как определено топливо и тип технологической схемы осуществляется подбор основного оборудования и его расчет по существующим методикам и оценка эффективности по эксергетическим и термоэкономическим показателям.

В главе 4 представлена модель интеграции объектов малой распределенной генерации, использующих различные виды энергетических ресурсов, в энергетическую систему Республики Вьетнам с учетом требований энергетической безопасности и перспектив развития возобновляемых источников энергии в Республике Вьетнам. С помощью этой модели может быть составлен соответствующий план развития энергетики, выбраны тип электростанции, топливо и регион размещения мини-ТЭС.

В настоящее время в Республике Вьетнам существует несколько сценариев развития энергетики: С0 – теоретический сценарий, который не учитывает политические ограничения, такие развитие ВИЭ, снижение потребления угля, мероприятия по энергосбережению; С1 – сценарий, учитывающий применение ВИЭ без применения энергосбережения; С2 – к сценарию С1 добавляется ограничение по инвестициям в новые угольные электростанции после 2025 года; С3 – к сценарию С1 добавляются расчеты по инвестициям в технологии энергоэффективности; С4 – объединяет сценарии С1, С2 и С3. Наличие нескольких сценариев развития энергетики Республики Вьетнам свидетельствует об активном поиске оптимального пути развития, который невозможен без использования объектов малой распределенной энергетики.

Согласно оценкам, которые представлены в сценариях развития энергетики Вьетнама С0, С1, С2, С3 и С4, к 2030 году Вьетнаму будет не хватать около 50 ТВт·ч энергии, что эквивалентно 5700 МВт установленной мощности. Согласно среднему показателю в мире, на малые электростанции приходится около 10%, поэтому Вьетнаму необходимо построить небольшие тепловые электростанции общей мощностью $N = 570$ МВт.

В настоящее время в Республике Вьетнам работают солнечные электростанции, расположенные преимущественно в провинции Нинь Туан, где интенсивность солнечного излучения имеет наиболее высокие значения. Все построенные в провинции Нинь Туан солнечные электростанции имеют достаточно большую мощность – более 30 МВт. При подключении их к централизованной сети возникают проблемы из-за ее перегруженности. Возможности малой распределенной генерации, которая представляет собой объекты мощностью до 25 МВт, практически не использованы. Важной особенностью таких объектов является то, что они могут работать автономно и не создадут дополнительную нагрузку на распределительные сети.

Для моделирования интеграции объектов малой распределенной генерации в энергетическую систему Республики Вьетнам был проведен анализ уровня экономического развития провинций для размещения данных объектов. Критерием выбора было население более 1 млн.человек (за исключением самой «солнечной» провинции Нинь Туан) и ВВП на душу населения более 2,5 тыс.долларов. При этом рассматривалась доступность угля, природного газа и солнечной энергии. Таким образом, для размещения объектов малой энергетики были выбраны 7 провинций, данные по которым представлены в таблице 6.

Рассмотрены варианты строительства паротурбинных угольных и гибридных газотурбинных мини-ТЭС с использованием солнечной энергии с соотношением их мощностей α_k , представляющее собой дискретную величину в диапазоне от 0,2 до 0,8.

Суммарная мощность паротурбинных мини-ТЭС составляет, МВт:

$$N_{ПТУ} = 570\alpha_k, \quad (17)$$

а их количество в зависимости от выбранной мощности определяется:

$$n = N_{ПТУ} / N_i, \quad (18)$$

где N_i – мощность наиболее эффективной мини-ТЭС по результатам энергетического анализа.

Таблица 6. Основные данные по провинциям Республики Вьетнам, выбранным для размещения мини-ТЭС

№ п/п	Наименование провинции или города	ВВП на душу населения (тыс. долл. США / чел / год)	Население, чел.	Интенсивность солнечного излучения DNI, кВт·ч/м ²
<i>Угольные паротурбинные мини-ТЭС</i>				
1	Хай Фонг	4,217	1837173	700
2	Куанг Нинь	5,11	1320324	675
<i>Гибридные газотурбинные мини-ТЭС</i>				
3	Бин Дуонг	5,681	2 426 561	1 285
4	Да Нанг	3,612	1 134 310	1 293
5	Хэн Хоа	2,698	1 231 107	1 620
6	Нинь Туан	1,724	590 467	1 764
7	Хо Ши Мин	6,725	8 993 082	1 443

Соответственно мощность гибридных мини-ТЭС рассчитывается по формуле:

$$N_{ГБ} = 570(1 - \alpha_k), \quad (19)$$

а количество гибридных мини-ТЭС определяется аналогично формуле (18).

После округления количества мини-ТЭС до целых значений отношение мощности гибридных тепловых электростанций (4,6 МВт, 11,86 МВт) к мощности паротурбинных тепловых электростанций, использующих угли типа 4б, 5б, 6а и 6б, составляет α'_k . Соответственно доли гибридных мини-ТЭС мощностью 4,6 (m_1) и 11,86 (m_2) МВт рассчитываются по формулам:

$$m_1 = \alpha'_k \frac{\sum N_{ГБ4,6}}{4,6}, \quad m_2 = (1 - \alpha'_k) \frac{\sum N_{ГБ11,86}}{11,86}, \quad (20)$$

Учитывались первоначальные инвестиции (K) в паротурбинные и гибридные мини-ТЭС, а также стоимость эксплуатации и обслуживания (C) данного оборудования. Затраты на топливо – уголь для мини-ТЭС с ПТУ и природный газ для гибридных станций – рассчитывались по ценам ($Ц_T$) для Республики Вьетнам на 2020 год.

В качестве критерия выбора наилучшего варианта интеграции мини-ТЭС в энергетическую систему Республики Вьетнам был выбран коэффициент термoeкономической эффективности, который представляет собой совокупность энергетических и экономических показателей:

$$\varphi = \eta_{\text{exобщ}} \left/ \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^n (K + C)_i}{(B_T \cdot Ц_T)_i} \right) \right. \Rightarrow \max \quad (21)$$

Эксергетические КПД паротурбинной угольной $\eta_{\text{exПТУ}}$ и гибридной газотурбинной мини-ТЭС $\eta_{\text{exГБ}}$ рассчитываются по формулам:

$$\eta_{\text{exПТУ}} = \frac{N_{\text{ПТУ}i}}{E'_{c.a} + \sum L_i + E'_y + E_{\text{Mex}}}, \quad (22)$$

$$\eta_{\text{exГБ}} = \frac{N_{\text{ГБ}i}}{E_T + \sum L_i + E_B}, \quad (23)$$

Общий эксергетический КПД для рассматриваемого варианта рассчитывается по зависимости:

$$\eta_{\text{exобщее}} = \frac{\sum_1^m N_{\text{ГБ}i} + \sum_1^n N_{\text{ПТУ}i}}{\sum_i^m (E_{T_i} + \sum L_i + E_{B_i}) + \sum_1^n (E'_{c.ai} + \sum L_i + E'_{y_i} + E_{\text{Mex}_i})}, \quad (24)$$

Обозначения в формулах (22)-(24) аналогичны формулам (1)-(4).

Расчеты были проведены для 16 вариантов размещения мини-ТЭС в провинциях Республики Вьетнам при изменении доли гибридных мини-ТЭС, мощности мини-ТЭС определенного типа и их количества. Для паротурбинных мини-ТЭС, работающих на угле, были просчитаны варианты для всех типов используемого угля.

Результаты выбора наилучшего варианта по значению общего показателя термoeкономической эффективности распределения мини-ТЭС по типу и мощности представлены в таблице 7. Данные значения были определены с учетом снижения стоимости первоначальных инвестиций согласно прогнозу на 2030 год. Полученные результаты показывают, что паротурбинные станции, работающие на угле, должны быть расположены ближе к месторождениям угля – в провинциях Хай Фонг и Куанг Нинь. Целесообразно строить только мини-ТЭС мощностью 25 МВт, поскольку они обладают наибольшим эксергетическим КПД по сравнению со станциями меньшей мощности. Их эксергетический КПД находится на уровне 34%. Данные провинции расположены на севере Вьетнама и имеют низкую

интенсивность солнечного излучения, за счет чего эксергетический КПД гибридных станций в этих провинциях существенно ниже, чем для южных и составляет около 31%, поэтому размещать гибридные станции в данных провинциях не рекомендуется.

Термоэкономический КПД для паротурбинных станций, работающих на угле, существенно ниже, чем для гибридных. Однако, необходимо учитывать, что уголь для северных провинций является местным топливом и доставка его на станцию является дешевой и надежной.

Таблица 7. Показатели наилучшего варианта интеграции мини-ТЭС в энергетическую систему Республики Вьетнам

Вариант: 20% угольных паротурбинных (уголь тип 4б) и 80 % гибридных газотурбинных мини-ТЭС									
Тип	Наименование провинции или города	Мощность, МВт	Количество мини-ТЭС	Расход топлива на 1 мини-ТЭС, кг/с	Первоначальные инвестиции, млн. долл. США	Стоимость эксплуатации и обслуживания в год, млн.долл. США	Затраты на топливо в год, млн. США	Эксергетический КПД, η_{ex} , %	Термоэкономический КПД, ϕ , %
Угольные паротурбинные	Хай Фонг+ Куанг Нинь	25	4	2,85	120	3,33	21,54	34,67	4,49
Гибридные мини-ТЭС	Бин Дуонг	4,6	14	0,24	148,57	0,71	51,5	36,3	7,41
		11,86	2	0,685	54,72	0,26	24,95	32,8	7,1
	Да Нанг	4,6	5	0,239	53,06	0,26	21,76	36,4	7,41
		11,86	0	0,679	0	0	0	33,0	0
	Хэн Хоа	4,6	14	0,235	148,57	0,71	59,92	37,0	7,45
		11,86	2	0,671	54,72	0,26	24,44	33,5	7,16
	Нинь Туан	4,6	24	0,233	254,69	1,23	102	37,3	7,47
		11,86	8	0,667	218,89	1,05	97,18	33,7	7,18
	Хо Ши Мин	4,6	14	0,238	148,57	0,71	60,68	36,6	7,43
		11,86	0	0,678	0	0	0	33,1	0
Суммарные (средние) значения		568,92			1202	8,54	402	36,86	7,36

Гибридные станции обладают более высокой эффективностью, особенно мощностью 4,6 МВт. Размещение гибридных мини-ТЭС рекомендуется в провинциях Бин Дуонг, Да Нанг, Хэн Хоа, Нинь Туан, Хо Ши Мин, расположенных в южной и юго-восточной части Вьетнама. Кроме того, эти провинции обеспечены поставками сжиженного природного газа. Эксергетический КПД гибридных станций может достигать 37,3%, а термоэкономический – 7,07% (с учетом снижения стоимости первоначальных инвестиций к 2030 г. – 7,36%). Для наилучшего варианта размещения мини-ТЭС этот показатель для всего сегмента малой распределенной энергетики составил 6,77% (с учетом снижения стоимости первоначальных инвестиций к 2030 г. – 7,36%). Для других вариантов размещения мини-ТЭС общий термоэкономический КПД составлял от 5,53 до 6,74%.

Структура энергетической системы Республики Вьетнам с учетом прогноза ее развития на 2030 год и интеграции объектов малой распределенной генерации в количестве 120 общей мощностью 570 МВт, расположенных в 7 провинциях представлена в диссертации.

В этом варианте строительство автономных электростанций позволит сэкономить на строительстве ЛЭП 500 кВ, проходящей через точки 1-2, 4-5, общей расчетной протяженностью 150 км. Стоимость строительства линии 500 кВ составляет 105,8 млн. долл. Стоимость угольной электростанции мощностью 600 МВт во Вьетнаме составляет 1,26 млрд. долларов. Таким образом, строительство малых автономных тепловых электростанций позволит сэкономить более 163,8 млн. долл. на крупной тепловой электростанции, подключенной к национальной сети 500 кВ. Размещение мини-ТЭС двух типов – паротурбинных, работающих на

угле, и гибридных, работающих на базе газотурбинных установок и солнечных воздушных нагревателей, в 7 провинциях Республики Вьетнам позволит обеспечить развитие сектора малой распределенной энергетики и надежное обеспечение населения данных провинций электрической энергией. Интеграция автономных мини-ТЭС в энергетическую систему страны снизит нагрузку на электрические сети и будет способствовать интенсивному развитию данных провинций.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Определены перспективы внедрения объектов малой распределенной генерации, работающих на основе использования традиционных и возобновляемых энергоресурсов, в энергетическую систему Республики Вьетнам; предложена классификация мини-ТЭС по типу первичных энергоресурсов и по другим классификационным признакам. Выявлено, что для малых энергетических объектов, которые могут быть размещены на территории Вьетнама целесообразно использование угля, газа и солнечной энергии в связи с их доступностью и значительным потенциалом для использования в гибридных технологических схемах объектов малой распределенной энергетики.

2. Рассмотрены технологические схемы мини-ТЭС, которые могут быть использованы в секторе малой энергетики Республики Вьетнам – паротурбинные, работающие на угле, и газотурбинные. Проведен расчет данных схем для диапазона мощностей – паротурбинных от 6 до 25 МВт и газотурбинных от 1,2 до 15,5 МВт. Результаты расчетов показали, что КПД тепловых электростанций малой мощности до 25 МВт в среднем гораздо ниже, чем для более мощных станций, поэтому необходимо реализовать энерго- и ресурсосберегающие мероприятия, например усовершенствовать схему с ГТУ, используя солнечную энергию для подогрева поступающего в камеру сгорания воздуха.

3. Разработана математическая модель технологической схемы гибридной мини-ТЭС с использованием газотурбинной установки и нагревом части воздуха, сжатого в компрессоре, в солнечном нагревателе, расположенном на башне и работающем на основе технологии концентрации солнечного излучения, определены режимные параметры и показатели эффективности мини-ТЭС мощностью 4,6 и 11,86 МВт при изменении условий – интенсивности прямого нормального излучения (DNI) и температуры окружающего воздуха. Полученные данные показывают, что при изменении DNI от 0 до 745,98 кВт/м² расход топлива для мини-ТЭС мощностью 4,6 МВт снижается на 57,2%, а для мини-ТЭС мощностью 11,86 МВт – на 55,5%. Расчеты, выполненные для годового цикла работы, показывают снижение расхода топлива для климатических условий данной провинции на 7,1 и 5,3% соответственно.

4. Разработана обобщенная методика выбора типа технологической схемы мини-ТЭС и ее расчета на основе использования традиционных и возобновляемых энергетических ресурсов.

5. Разработана модель интеграции объектов малой распределенной генерации в энергетическую систему Республики Вьетнам, критерием выбора является термoeкономический КПД, значения которого для наилучшего варианта размещения мини-ТЭС с учетом значений первоначальных инвестиций в строительство на 2030 год составило 7,36%.

6. Проведена оценка повышения экономичности сегмента малой распределенной генерации, экономия в масштабе энергетической системы составила более 163,8 млн. долл.

Итоги выполненного исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Перспективным является совершенствование технологических схем гибридных мини-ТЭС и входящего в их состав оборудования, а также использование низкокалорийных топлив в данных схемах, в частности промышленных газов, низкосортных твердых топлив.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science:

