



Давыдов Олег Анатольевич

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ
ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ**

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

Научный руководитель:

Аверьянов Владимир Константинович доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, заслуженный деятель науки РФ

Официальные оппоненты:

Васильев Григорий Петрович доктор технических наук, научный руководитель ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ», г. Москва

Токарев Иван Сергеевич кандидат технических наук, заместитель начальника отдела ПАО «Газпром», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация Санкт-Петербургский Государственный архитектурно-строительный университет

Защита состоится 17 декабря 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета У.2.4.5.45 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Гидрокорпус № 2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defences-calendar/> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.2.4.5.45,
доктор техн. наук, с.н.с.



Куколев Максим Игоревич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Существующие тенденции развития энергоэффективных технологий, цифровизации, а также более активного использования вторичных и возобновляемых природных ресурсов интенсифицируют исследования и разработки для рационализации с этих позиций систем энергообеспечения газораспределительных станций (ГРС). Анализ научно-технической литературы показывает, что поиск способов энергообеспечения ГРС, отвечающих современным тенденциям, направлен на разработку более совершенных энергоустановок, использующих избыточное давление транспортируемого газа, возобновляемых природных источников без использования органических видов топлива, а также совершенствование детандер-генераторных агрегатов (ДГА). Техническими средствами здесь являются энергосберегающие детандер - генераторные агрегаты (ДГА) и оборудование, воспринимающее и преобразующее солнечную, ветровую энергию, а также теплоту окружающего ГРС пространства, то есть возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

В автоматизированных газораспределительных станциях (АГРС), получивших свое развитие в последние годы, закладывается комплексный подход к энерго- и ресурсоснабжению таких станций с использованием для выработки электроэнергии ДГА. При этом начинающие свое развитие станции нового поколения - АГРС-НП, как энергоэффективные и экологически более чистые, оснащаются оборудованием позволяющим переходить на безлюдную эксплуатацию с периодичностью посещения станции для обслуживания персоналом один, два раза в год, и использующих для энергообеспечения автономные энергоустановки, базирующие свою работу на энергии транспортируемого газа при его дросселировании и энергетическом потенциале окружающего АГРС-НП пространства.

Задача создания устойчиво функционирующих эффективных автономных систем энергоснабжения АГРС-НП с использованием энергии перепада давления транспортируемого газа и ВИЭ является актуальной. Ее решение будет способствовать снижению затрат органических видов топлива и развитию энергоэффективных безлюдных технологий. При существенной вариативности схемных решений и исходных данных актуальным является разработка отсутствующих в настоящее время методических подходов к оценке эффективности автономных систем энергоснабжения АГРС-НП с использованием ДГА и ВИЭ.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам энергоснабжения ГРС с использованием ВИЭ и энергии перепада давления транспортируемого газа посвящено значительное число работ. К настоящему времени исследованы различные схемные решения энергоустановок и конструкции ДГА, в том числе в комбинации с ВИЭ.

В качестве базового источника энергии в автономных энергокомплексах для АГРС-НП рассматривается ДГА, значительный вклад в исследования которых внесли Белоусов А.Е., Беседин С.Н., Зарницкий Г.Э., Забелин Н.А., Мальханов В.П., Мальханов О.В., Матвеев Ю.В., Смирнов М.В., Фокин Г.А., Харисов И.С. и др. Значительный вклад в исследование систем энергоснабжения на основе ДГА внесли Агабабов В.С., Александров А.А., Архарова А.Ю., Байдакова Ю.О., Гатауллина А.Р., Джураева Е.В., Жавроцкий С.В., Колосов А.М., Костюченко П.А., Кулагина О.В., Рогова А.А., Степанец А.А., Фокин Г.А. и др.

В качестве источника низкопотенциальной энергии в ЭК АГРС-НП рассматриваются системы с использованием температурного потенциала окружающего пространства, значительный вклад в исследования которых внесли Безруких П.П., Бутузов В.А., Васильев Г.П., Елистратов В.В., Журмилова И.А., Сапрыкина Н.Ю., Сибгатуллин А.Р., Токарев И.С., Толмачев В.Н., Уляшева В.М., Филатов С.О. и др.

В России имеются опытные разработки автономных систем энергоснабжения для конкретного типа АГРС-НП, но методика сравнительной оценки эффективности подобного рода схемных решений и выбора наиболее предпочтительного варианта в зависимости от начальных условий отсутствует.

В настоящей работе исследуется ранее комплексно не рассматриваемая автономная система энергоснабжения АГРС-НП без использования для собственных нужд станции органических видов топлива. Помимо новых схемных решений разрабатываются алгоритмы расчета параметров технологически связанных элементов энергокомплекса (ЭК) АГРС-НП с оценкой его эффективности, так как это в значительной мере влияет на качество функционирования АГРС-НП в целом.

Целью диссертационной работы является разработка методики оценки эффективности автономных систем энергоснабжения АГРС-НП на базе ДГА с использованием ВИЭ.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

- разработка конструктивно - технологической схемы, алгоритма и комплексной модели оценки эффективности вариантов ЭК АГРС-НП;
- анализ с помощью разрабатываемых моделей эффективности вариантов ЭК АГРС-НП с ДГА и ВИЭ;
- определение состава и характеристик оборудования автономного ЭК с ДГА и ВИЭ с учетом условий, и параметров функционирования АГРС-НП.

Предмет исследования - взаимосвязи функционирования оборудования автономного ЭК АГРС-НП на базе ДГА с использованием возобновляемых видов энергии.

Научная новизна исследований заключается в следующем.

1. Обоснована конструктивно-технологическая схема ЭК, обеспечивающая функционирование АГРС-НП без применения для собственных нужд станции органических видов топлива.
2. Предложен методологический подход к АГРС-НП как к единой энергетической системе: теплопотребление в здании АГРС, потенциал окружающей среды, электропотребление АГРС, ЭК, потенциал транспортируемого газа.
3. Разработаны алгоритмы и на их основе комплексная математическая модель оценки эффективности автономного ЭК газораспределительной станции на базе ДГА с использованием ВИЭ.
4. В результате с помощью разработанной методики оценки эффективности ЭК на основе ДГА и ВИЭ определены состав и характеристики оборудования автономного ЭК с ДГА и ВИЭ с учетом условий, и параметров функционирования АГРС-НП.

Теоретическая и практическая значимость работы. Обосновано применение новой схемы автономного ЭК АГРС-НП без потребления органических видов топлива. Разработанный алгоритм и созданная на этой основе программа расчёта параметров и выходных характеристик ЭК АГРС-НП дополняют существующие методики расчета ГРС и их систем энергоснабжения. Разработанная на основе исследований методика оценки эффективности и определения номинальных параметров ЭК АГРС-НП позволяет наиболее полно использовать для энергообеспечения вторичные ресурсы транспортируемого газа и потенциал окружающего АГРС-НП пространства с учетом конкретных условий. Результаты диссертационных исследований согласно прилагаемым в диссертации актам реализованы в 2 НИР и при анализе направлений развития газовой инфраструктуры.

Методология и методы исследования, применяемые в диссертационной работе, включают в себя анализ, синтез, моделирование, а также методы выбора параметров и режимов работы энергетических установок на альтернативных источниках и возобновляемых видах энергии.

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты научного обоснования конструктивно-технологической схемы ЭК АГРС-НП на базе ДГА с использованием ВИЭ, алгоритм и комплексная модель оценки эффективности ЭК АГРС-НП.
2. Результаты анализа влияния параметров энергетического оборудования на показатели ЭК АГРС-НП.

3. Результаты определения состава и характеристик оборудования вариантов автономного ЭК с ДГА и ВИЭ с помощью разработанной методики оценки эффективности ЭК на основе ДГА и ВИЭ с учетом условий и параметров функционирования АГРС-НП.

Степень достоверности и обоснованности результатов исследований основывается на обоснованности исходных предпосылок. Разработанная комплексная математическая модель ЭК АГРС-НП протестирована с реперными данными ранее опубликованных исследований.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях: Международных конгрессах «Энергоэффективность. XXI век. Саморегулирование. Архитектура. Инженерия. Цифровизация. Экология», СПб, в 2019 г., 2020г., 2021г., 2022г., Международных конгрессах «Энергосбережение и энергоэффективность. IT технологии. Энергобезопасность. Экология», СПб, 2021г, 2022г, 2023г.

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 7 печатных научных трудах.

Объем и структура работы. Диссертационная работа включает введение, пять глав и список литературы, изложенных на 178 страницах основного текста, приложений на 52 страницах текста, списка литературы из 117 наименований и содержит 62 рисунка, 37 таблиц.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, приведены цели и задачи исследований по оценке эффективности автономного энергоснабжения газораспределительных станций, дана общая характеристика диссертационной работы. Показано, что с точки зрения современных требований по энергосбережению и переходу на низкоуглеродные и безуглеродные технологии в газотранспортной системе на сегодня одним из перспективных направлений является использование энергии избыточного давления природного газа и возобновляемых видов энергии.

В первой главе приведен обзор и состояние развития современных способов автономного энергоснабжения газораспределительных станций с использованием ДГА и возобновляемых источников энергии. На основе анализа ранее выполненных исследований показано, что в настоящее время существует достаточная материально-техническая база производства ДГА и установок с ВИЭ, использующихся в ЭК для нужд газовой отрасли и в области жилищного строительства.

Особое значение при проектировании и оценке эффективности ЭК АГРС-НП имеет объективное определение прогнозных объемов и режимов потребления газа. В соответствии с этим, в главе рассмотрены особенности изменения расхода газа в зависимости от времени и

других факторов, выполнен анализ работ по оценке объемов газопотребления, приведена классификация ГРС и разделы в ней, являющиеся предметом исследований в настоящей работе.

В связи с актуальностью и малой изученностью автономных систем энергоснабжения АГРС без использования для собственных нужд органических видов топлива предметом исследований в настоящей работе являются автономный ЭК, использующий в качестве базового энергоисточника ДГА и возобновляемые низкотемпературные источники тепловой энергии.

В главе выполнен анализ потребления электрической и тепловой энергии на газораспределительной станции, рассмотрены способы снижения энергопотребления на собственные нужды, показано, что энергосберегающие технологии позволяют снизить установленную мощность ЭК АГРС-НП на 15-20%.

В главе, на основе анализа существующих исследований, обоснованы подходы к формированию базовой схемы ЭК АГРС-НП, рассматриваемой в дальнейшем в настоящей работе.

Завершается первая глава формулированием последовательности решения поставленных в диссертационной работе задач.

Глава 2 посвящена формированию методики обоснования схемных решений и выбора параметров ЭК АГРС-НП. Объектом исследования является автономный энергетический комплекс на базе ДГА, включающий пиковый теплообменник (ПКТО) в виде электроподогревателя (ЭП), теплонасосную установку (ТНУ) парокомпрессионного типа, воздушный теплообменник (ВТО) и грунтовый теплообменник (ГТО). Его схемное решение представлено на рисунке 1.

При обосновании схемного решения и последующего моделирования процессов, происходящих в ЭК, переменными величинами являются: давление транспортируемого газа на входе в АГРС-НП; температура транспортируемого газа на входе в АГРС-НП; температура наружного воздуха и теплоносителя грунтового теплообменника.

При построении модели приняты следующие ограничения: давление транспортируемого газа на выходе из АГРС-НП задается по условиям эксплуатации; энтальпия газа на выходе из ДГА равна энтальпии газа на входе в теплообменник подогрева газа; температура газа после ДГА (в выполненном численном эксперименте принята $t_d > -5^\circ\text{C}$).

В качестве теплоносителя в контуре парокомпрессионной ТНУ рассматривается озон безопасный хладагент R-134a, широко применяемый в настоящее время в холодильной технике. В работе определены эффективные режимы функционирования оборудования ЭК АГРС-НП на базе ДГА, ПКТО, ТНУ парокомпрессионного типа, ВТО и ГТО осуществляется исходя из следующего положения: количественные показатели оборудования должны быть достигнуты с

наименьшими затратами энергетических, финансовых и других ресурсов для ЭК в целом. Такая постановка задачи формализована в определении градиентным методом взаимосвязанных параметров и режимов функционирования оборудования ЭК АГРС-НП с минимально необходимыми для этого затратами. Факторное планирование расчетного эксперимента в этом случае позволяет найти наиболее эффективные параметры оборудования энергетического комплекса АГРС-НП.

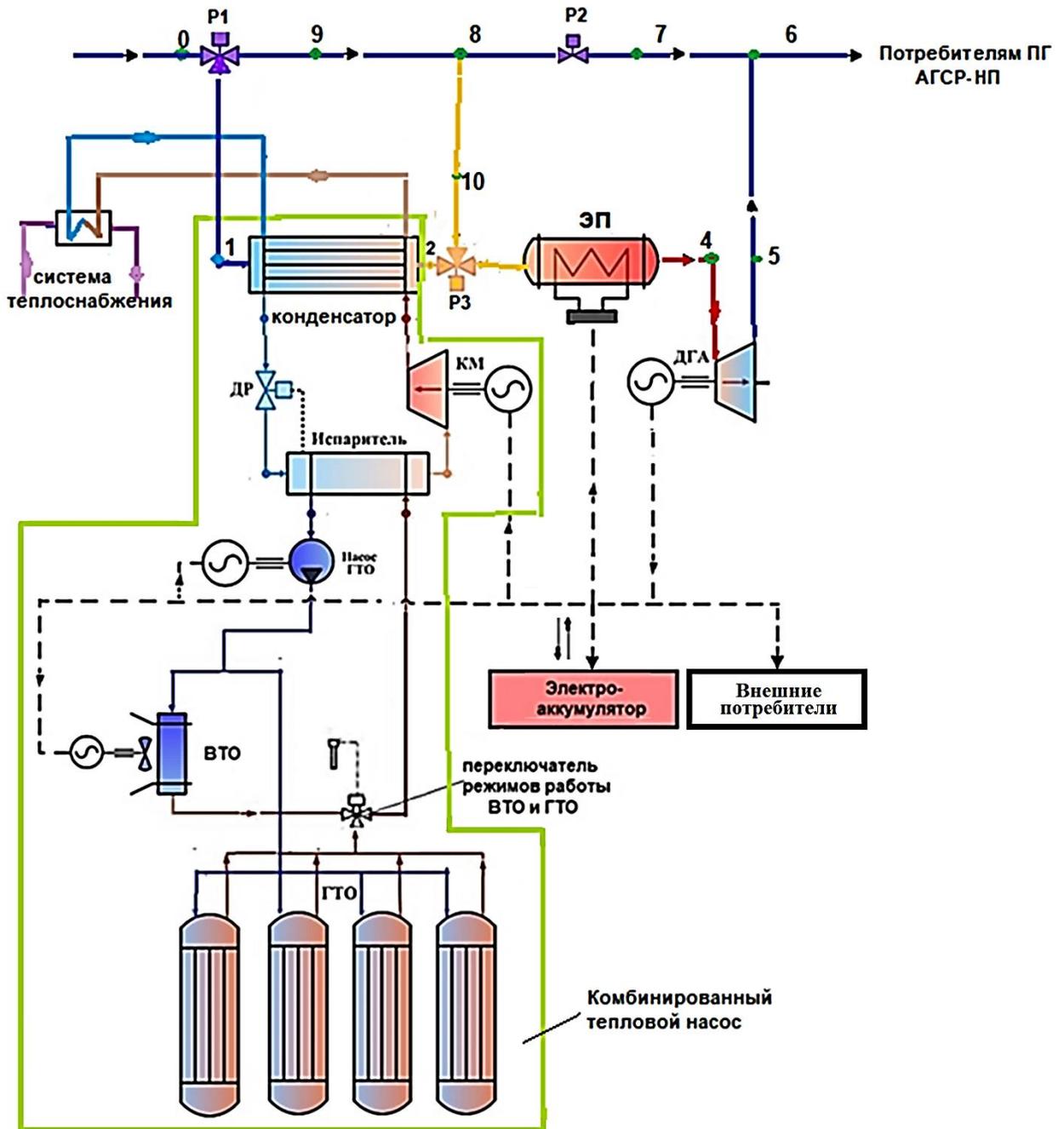


Рисунок 1 – Схемное решение автономного ЭК АГРС-НП

При решении задачи используются математические модели оборудования энергокомплекса АГРС-НП, представляющие собой уравнения, связывающие функции отклика с независимыми и управляемыми переменными (факторами).

При расчете параметров функционирования ЭК АГРС-НП активными факторами приняты: отношение тепловых мощностей конденсатора ТНУ и ПКТО $q_{\text{ПКТО}}^{\text{конд}}$, давление транспортируемого газа на входе АГРС-НП P_1 , электрическая мощность внешней нагрузки $N_{\text{эн_внеш}}$

В процессе моделирования нагрузочный режим ДГА задается мощностью внешней электрической нагрузки $N_{\text{эн_внеш}}$, значение которой в соответствии с планом расчетного эксперимента варьируется от 20 до 70 кВт.

Отношение тепловых мощностей ПКТО и конденсатора ТНУ $q_{\text{конд}}^{\text{ПКТО}}$ варьируется от нуля с шагом в 0,1, что формирует соответствующий тепловой баланс и режим функционирования ПКТО и конденсатора ТНУ.

Давление газа на входе АГРС-НП P_1 в соответствии с планом расчетного эксперимента принимается равным 2, 4 и 6 МПа, что определяет расходные характеристики ДГА и соответствующие режимы функционирования всех элементов энергокомплекса АГРС-НП.

Температура транспортируемого газа на входе T_1 и давление транспортируемого газа на выходе АГРС-НП P_2 приняты постоянными ($T_1 = 0^\circ\text{C}$, $P_2 = 1,2$ МПа) и в процессе моделирования не изменяются.

Обобщенный алгоритм моделирования режимов функционирования ЭК АГРС-НП представлен на рисунке 2.

Разработанная в главе 2 методика обоснования схемных решений и оценки эффективности системы энергоснабжения АГРС-НП позволяет, на основе сформированного обобщенного алгоритма расчета параметров и моделей основного оборудования, решать задачи выбора основного оборудования ЭК в зависимости от исходных данных конкретного объекта.

В главе 3 приведено описание алгоритмов расчета параметров функционирования основного оборудования ЭК АГРС-НП, а также математические модели: ДГА, как автономного источника электроэнергии; тепловой насосной установки, как устройства, принимающего, преобразующего и передающего энергию от низкопотенциальных источников потока газа; грунтового теплообменника, как источника низкопотенциальной теплоты; воздушного теплообменного аппарата, как элемента ВИЭ, способствующего повышению температурного потенциала грунтового теплообменника.

В главе 4 представлены результаты моделирования режимов и расчета параметров функционирования оборудования энергокомплекса АГРС-НП, выполнен анализ результатов

моделирования, а также дана оценка адекватности комплексной имитационной модели энергокомплекса АГРС-НП.

При условии минимума капитальных затрат оптимальные характеристики ЭК АГРС-НП с ДГА и ВИЭ определяются в следующем порядке:

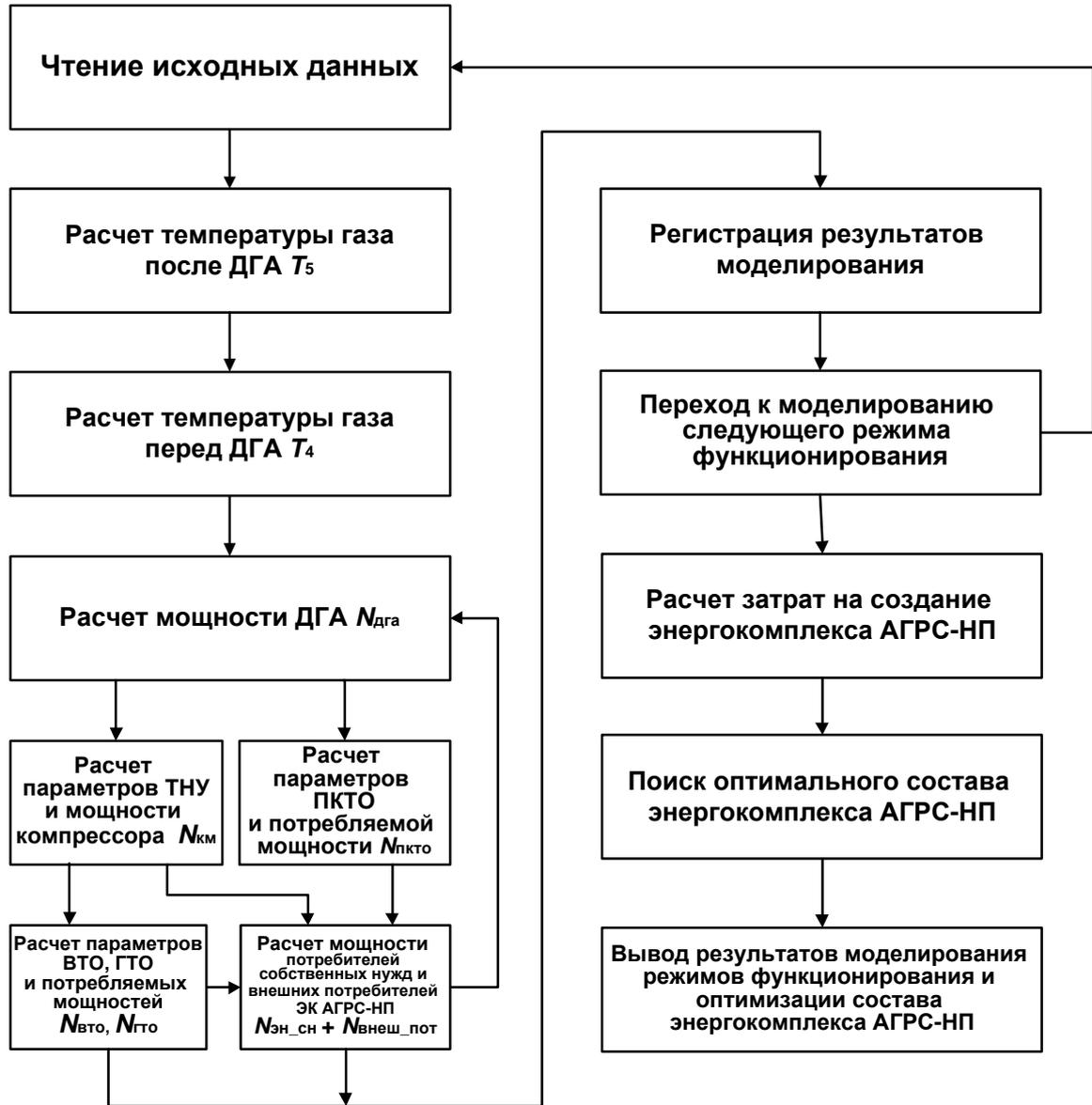


Рисунок 2 –Блок - схема расчета параметров модели ЭК АГРС-НП

- для эксплуатационных значений давления и температуры технологического газа на входе ДГА, заданного отношения тепловой мощности конденсатора ТНУ и тепловой мощности ПКТО рассчитывается количество теплоты, передаваемой газу в конденсаторе ТНУ и ПКТО для обеспечения допустимого снижения температуры газа за турбиной ДГА при условии стабильного электроснабжения внешней электрической нагрузки;

- по рассчитанному значению количества теплоты, передаваемого газу в конденсаторе ТНУ, определяется количество теплоты, передаваемое теплоносителем ВТО и ГТО хладагенту в испарителе ТНУ, и мощностные характеристики приводных механизмов оборудования ЭК АГРС-НП;

- по вычисленным значениям потребляемой приводными механизмами мощности, заданным параметрам электрической нагрузки ДГА, а также отношению тепловых мощностей конденсатора ТНУ и ПКТО, по известным удельным значениям рассчитываются показатели капитальных затрат;

- область минимальных значений капитальных затрат, определяемая по результатам анализа полученного множества значений в факторном пространстве всех нагрузочных режимов работы ДГА и отношения тепловых мощностей конденсатора ТНУ и ПКТО, соответствует оптимальным значениям мощностных и расходных характеристики ТНУ, ВТО и ГТО.

В полном факторном эксперименте выполнено моделирование 81 режимов функционирования ЭК АГРС-НП с ДГА и ВИЭ. При этом мощность электрической нагрузки (в диапазоне значений от 20 до 70 кВт), отношение тепловых мощностей конденсатора ТНУ и ПКТО (в диапазоне значений от 0 до 0,8) и давление газа на входе ДГА (в диапазоне значений от 2 МПа до 6 МПа) использовались как активные факторы. Мощностные и расходные характеристики оборудования (более 30 параметров) являлись функциями отклика, по численным значениям которых определены оптимальные режимы функционирования оборудования ЭК АГРС-НП с ДГА и ВИЭ.

Анализ результатов моделирования позволил установить:

1. Повышение давления газа P_1 на входе АГРС-НП обеспечивает выработку генератором детандера необходимой мощности при меньших расходах газа через ДГА. Так, при давлении газа на входе АГРС-НП 2 МПа, подогреве газа только в конденсаторе ТНУ и заданной внешней нагрузке в 70 кВт расчетный расход газа через ДГА составит 7,2 кг/с. При тех же условиях, но при давлении газа на входе АГРС-НП 6 МПа, расчетный расход газа через ДГА уменьшится до 1 кг/с (рисунок 3).

2. Максимальные значения вырабатываемой ДГА мощности соответствуют максимальным значениям внешней электрической нагрузки, минимальному значению давления газа на входе АГРС-НП ($P_1 = 2$ МПа) и максимально возможному подогреву газа в ПКТО ($\Delta q_{\text{пкто}} = 0,8$).

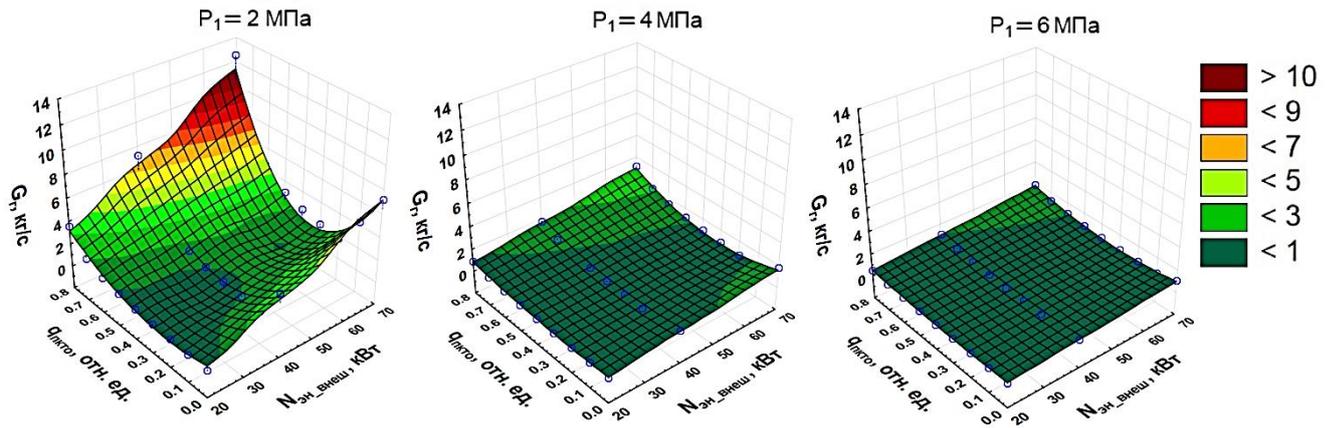


Рисунок 3 – Зависимость $G_T = f(P_1, N_{ЭН_внеш}, \Delta q_{ПКТО})$

Так, при давлении газа на входе АГРС-НП $P_1 = 2$ МПа и подогреве газа в основном в ПКТО ($\Delta q_{ПКТО} = 0,8$) для электроснабжения внешней нагрузки, мощностью 70 кВт, ДГА должен будет развивать мощность в 776,6 кВт. При тех же условиях, но при давлении газа на входе АГРС-НП 6 МПа, ДГА должен будет развивать мощность в 433,8 кВт (рисунок 4).

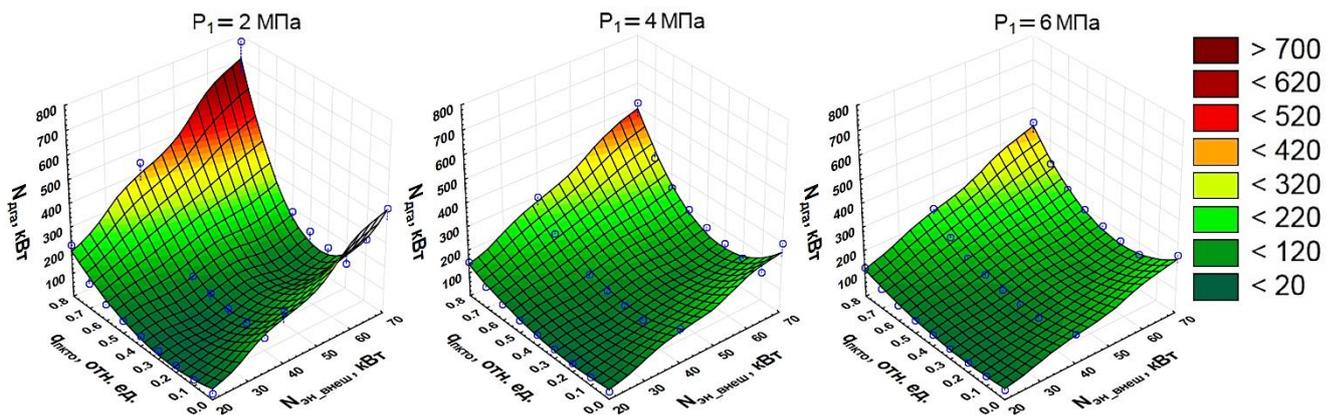


Рисунок 4 – Зависимость $N_{ДГА} = f(P_1, N_{ЭН_внеш}, \Delta q_{ПКТО})$

3. Максимальное количество теплоты, передаваемое газу при подогреве в конденсаторе ТНУ и ПКТО, соответствует максимальному значению внешней электрической нагрузки ($N_{ЭН_внеш} = 70$ кВт), минимальному давлению газа на входе АГРС-НП ($P_1 = 2$ МПа) и максимально возможному подогреву газа в ПКТО ($\Delta q_{ПКТО} = 0,8$). Так, при давлении газа на входе АГРС-НП $P_1 = 2$ МПа, подогреве газа в основном в ПКТО ($\Delta q_{ПКТО} = 0,8$) и заданной внешней электрической нагрузке мощностью 70 кВт, количество теплоты, передаваемое газу в теплообменных аппаратах, будет равно 855,9 кВт. При тех же условиях, но при давлении газа на входе АГРС-НП 6 МПа, количество теплоты, передаваемое газу в теплообменных аппаратах, будет равно 429,8 кВт (рисунок 5).

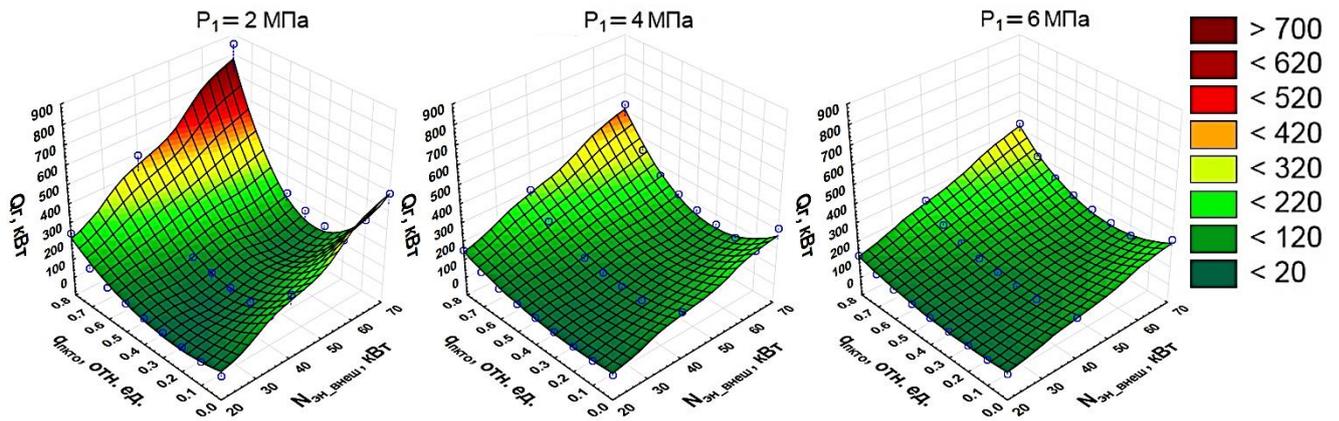


Рисунок 5 – Зависимость $Q_T = f(P_1, N_{ЭН_внеш}, \Delta q_{ПКТО})$

4. Режим работы конденсатора ТНУ зависит от нагрузочного режима ДГА и определяет режимы функционирования воздушного и грунтового теплообменных аппаратов. Так, при увеличении мощности внешней нагрузки с 20 до 70 кВт, количество тепловой энергии, передаваемой испарителю ТНУ от низкопотенциальных источников энергии (ВТО и ГТО), должно пропорционально увеличиваться с 25 до 173,5 кВт (рисунок 6). При этом наибольшее количество теплоты будет передаваться теплоносителем ВТО и ГТО хладагенту ТНУ в тех режимах функционирования оборудования энергокомплекса, когда газ, проходящий через ДГА, подогревается в основном в ПКТО ($\Delta q_{ПКТО} = 0,8$).

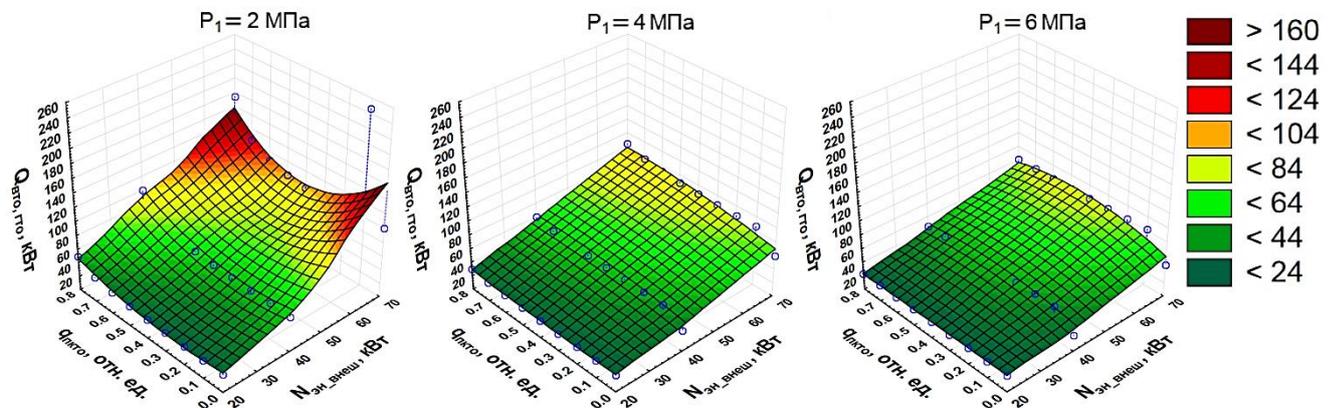


Рисунок 6 – Зависимость $Q_{ВТО,ГТО} = f(P_1, N_{ЭН_внеш}, \Delta q_{ПКТО})$

В результате имитационного моделирования определены оптимальные параметры и режимы функционирования оборудования энергокомплекса АГРС-НП. Так, по критерию минимума капитальных затрат установлено оптимальное отношение тепловых мощностей конденсатора ТНУ и ПКТО (0,8 и 0,2 соответственно). Таким образом, количество энергии, потребляемое электрооборудованием для обеспечения собственных нужд ЭК АГРС-НП, может быть снижено за счет использования дополнительного теплообменного аппарата, мощность которого должна оптимально соответствовать тепловой мощности конденсатора ТНУ. Так, при внешней электрической нагрузке в 40 и 70 кВт, давлении газа на входе АГРС-НП $P_1 = 2$ МПа

электрическая мощность собственных нужд энергокомплекса с подогревом газа в основном в ПКТО ($\Delta q_{\text{пкто}} = 0,8$) составит 403,29 кВт и 704,75 кВт соответственно. При той же электрической нагрузке, но с подогревом газа только в конденсаторе ТНУ (без ПКТО), мощность потребителей собственных нужд ЭК составит 5,33 кВт и 10,65 кВт соответственно.

Разработанная математическая модель и полученные в ходе исследований результаты оптимизации режимов функционирования оборудования позволяют минимизировать стоимость оборудования ЭК АГРС-НП с ДГА и ВИЭ.

В главе 5 из условий соответствия требованиям нормативных документов по обеспечению перехода к безлюдным технологиям эксплуатации энергетического оборудования рассматриваются характеристики функционирования АГРС-НП в годовом цикле с выявлением критических ситуаций. Рассмотрены условия работы и показатели эффективности ЭК АГРС-НП с различными схемными решениями на примере конкретных исходных данных: использование одноступенчатого ДГА и комбинированного теплового насоса (КТН), в котором переключение с ГТО на ВТО осуществляется по большему значению коэффициента преобразования - COP; использование одноступенчатого ДГА и воздушного теплового насоса - ВТН; использование двухступенчатого ДГА и ВТН.

Основные результаты расчета при использовании одноступенчатого ДГА и КТН с температурой подогрева ПГ в конденсаторе КТН = 60⁰С представлены на рисунке 7.

Балансовый расчет электрической мощности ДГА и потребителей электроэнергии (обеспечение собственных электрических нужд АГРС-НП, мощности компрессора и насоса КТН, мощности электроподогрева ПГ в ЭП) позволяет определить, с учетом тепловой нагрузки на отопление и вентиляцию здания ГРС, установленные электрические мощности КТН и ДГА, которые в рассматриваемом варианте составили: $N_3^{\text{дга}} = 63,74$ кВт; $N_3^{\text{тну}} = 39,85$ кВт.

В отличие от варианта с КТН, использование только ВТН приводит к некоторому увеличению необходимого электроподогрева ПГ в периоды, когда COP ВТН < COP ГТН (ноябрь-март). Установленные электрические мощности ДГА и ТНУ в этом варианте соответственно составили:

$$N_3^{\text{дга}} = 97,79 \text{ кВт}; N_3^{\text{тну}} = 65,19 \text{ кВт}.$$

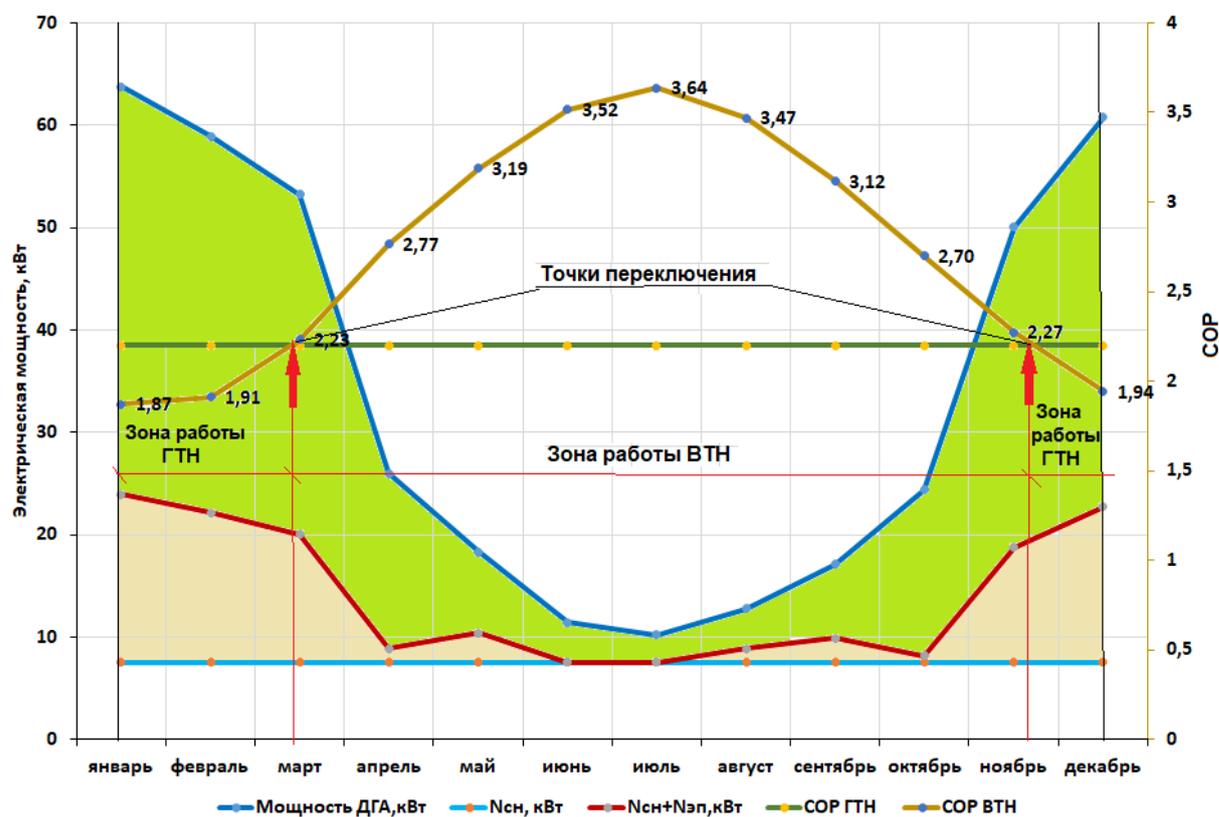


Рисунок 7 – Баланс электрической мощности АГРС-НП с одноступенчатым ДГАи КТН при подогреве в ТНУ на 60°С

Увеличение установленной мощности ДГА и ТНУ в варианте 2 по сравнению с вариантом 1 связан с меньшей COP ВТН при низких температурах наружного воздуха. Здесь ограничивающим условием применения схемных решений с только ВТН на АГРС-НП являются районы, где расчетная температура наружного воздуха $t \leq -25^{\circ}\text{C}$.

Основным недостатком рассмотренных выше вариантов с одноступенчатым ДГА является необходимость дополнительного использования электрического подогрева ПГ или существенное увеличение мощности ТНУ. При двухступенчатой схеме ДГА обеспечивается покрытие тепловых и электрических нагрузок бестопливной АГРС-НП в годовом диапазоне. Установленная электрическая мощность двухступенчатого ДГА с КТН существенно ниже, чем в варианте с одноступенчатым ДГА с КТН.

Из условий обеспечения электроэнергией АГРС-НП при малых расходах ПГ в работе рассмотрены условия функционирования ЭК АГРС-НП при переменных графиках нагрузки. Выполненные расчеты режимов работы ЭК АГРС-НП с двухступенчатым ДГА и ВТН показали, что при принятых условиях расчета (неизменность перепада давления 5,5/1,2 МПа и температуры ПГ на входе 281 °К) на АГРС-НП ДГА уже может не обеспечить в летний период без аккумулирования собственные нужды по электроэнергии.

С этой целью в работе выполнены исследования балансов электроэнергии на АГРС-НП в период минимального расхода ПГ на ДГА в июле (рисунок 8). Исследования позволили определить предельную электроэнергию/мощность собственных нужд АГРС-НП, которая может быть обеспечена при использовании накопления дополнительной электроэнергии, осуществляемой в суточном диапазоне конкретной газораспределительной станции.

Предельная электрическая мощность собственных нужд АГРС-НП в рассматриваемом примере составила $N_{CH}^{пред} = 10,5$ кВт, то есть, устойчивая работа ЭК с характеристиками расходов и перепадом давления ПГ при конкретных исходных данных возможна при этом значении или меньше.

Оценка энергетической эффективности энергокомплексов (ЭК) с использованием ВИЭ чаще всего выполняется по нормированной (выравненной) стоимости генерации энергии (LCOE). Вместе с тем, методика LCOE в случае автономного электроснабжения АГРС-НП не в полной мере отображает влияние различных параметров ПГ на показатели эффективности работы ЭК.

При обычно рассматриваемом постоянстве проектного расхода электроэнергии на собственные нужды АГРС в весь период жизненного цикла для учета специфики энергообеспечения

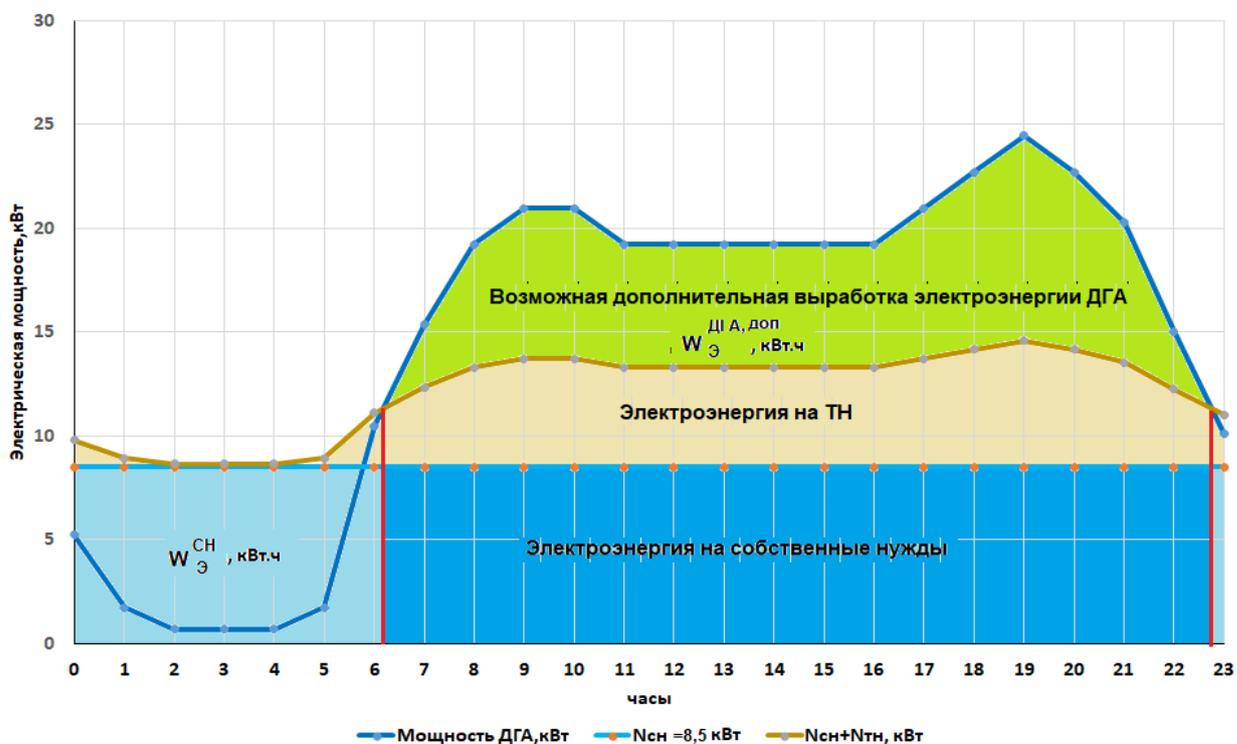


Рисунок 8 – Суточный график расхода ПГ АГРС-НП в летний период

при различной пропускной способности АГРС вместо выравненной стоимости генерации энергии принимается за основу сравнения **выравненная удельная стоимость энергообеспечения АГРС-НП**, определяемая по формуле:

$$LCOB = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{Cap_t + I_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n B_t}, \text{ руб./тыс. м}^3, \quad (1)$$

Для предварительной оценки энергетической эффективности вариантов ЭК АГРС формула (1) представляется в виде:

$$LCOB = \frac{LCC_{\text{пр.}}}{V_{\Gamma}}, \text{ руб./тыс. м}^3, \quad (2)$$

где: V_{Γ} – годовой объем редуцированного ПГ, проходящего через АГРС-НП;

$LCC_{\text{пр.}}$ – приведенная стоимость жизненного цикла ЭК, определяемая по формуле:

$$LCC_{\text{пр.}} = Cap_{\text{выр.}} + I_{\text{выр.}}, \quad (3)$$

где: $Cap_{\text{выр.}}$ – выравненные на год инвестиционные вложения в ЭК за счет использования фактора времени с помощью коэффициента возврата капитала (capital recovery factor – CRF), определяемые по формуле:

$$Cap_{\text{выр.}} = Cap \times CRF. \quad (4)$$

Здесь CRF определяется по формуле $CRF = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$,

где: i – ставка рефинансирования;

n – жизненный цикл ЭК, лет.

$I_{\text{выр.}}$ – выравненные на год операционные затраты и затраты на содержание ЭК.

Поскольку время службы аккумуляторной батареи (АБ) значительно различается от срока службы другого оборудования ЭК (гарантированный сроком службы 5 лет), то инвестиционные затраты на АБ необходимо приводятся к сроку жизненного цикла ЭК.

Формула приведения стоимости АБ ($C_{\text{АБ}}$) определяется по выражению:

$$C_{\text{АБ}} = C_{\text{АБ},0} \times \left(1 + \frac{1}{(1+i)^5} + \frac{1}{(1+i)^{10}} + \frac{1}{(1+i)^{15}} \right), \quad (5)$$

где $C_{\text{АБ},0}$ – первоначальная цена АБ.

Вариант с минимальным значением LCOB считается более предпочтительным.

Предложенный в диссертационной работе показатель – выровненная стоимость жизненного цикла энергообеспечения ГРС автономным энергоисточником, отнесенная к единице редуцированного газа, позволяет оценить энергетическую эффективность различных вариантов ЭК АГРС-НП, работающих в различных условиях.

Для годового объема ПГ, проходящего через АГРС-НП при принятом примере $V = 47\,285\,450,74 \text{ м}^3$, в работе определены приведенная стоимость жизненного цикла ЭК (LCC) и удельная стоимость ЭК ($LCOB$) (табл.1).

Таблица 1 – Приведенная стоимость *LCC* и *LCOB*

№ вар	Конфигурация ЭК	LCC, тыс.руб.	LCOB, руб./тыс.м ³
1	Одноступенчатый ДГА+КТН(ГТО+ВТО) +ПКТО+ АБ	4206,09	88,95
2	Одноступенчатый ДГА+ВТН+ПКТО+ АБ	3961,91	83,79
3	Двухступенчатый ДГА+КТН(ГТО+ВТО) +ПКТО+ АБ	3719,36	78,66
4	Двухступенчатый ДГА+ВТО +ПКТО+ АБ	2986,799	63,17
5	ЭК ГРС с котельной и ГПУ	1904,59	40,28
6	Двухступенчатый ДГА+ВТН+АБ с энергосберегающими инновационными технологиями	1118,14	23,6

В соответствии с постановлением Правительства РФ от 21.09.2019 № 1228 «О принятии Парижского соглашения», а также указом Президента от 04.11.2020 № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» РФ планирует сократить выбросы парниковых газов на уровне 70% от показателя 1990 года к 2030 году и выйти на углеродно-нейтральный путь развития к 2060 году. Поскольку ЭК АГРС-ПН не использует ПГ для сжигания в котельной, которая в обычных ГРС обеспечивает подогрев ПГ перед редуцированием, а также обеспечивает теплоснабжение здания ГРС в отопительный период и электроснабжение от автономной энергоустановки, то экологический эффект от внедрения ЭК АГРС-ПН будет равен эквиваленту снижения выбросов ГРС такой же производительности.

Годовые выбросы парниковых газов в варианте ЭК ГРС с котельной и ГПУ в работе определен в размере 96,54 т. Тогда из условия равнозначности затрат по сравниваемым вариантам 4 и 5:

$LCC_4 - LCC_5 = W_{\text{год}}^{\text{выб}} \times C_{\text{CO}_2}^{\text{налог}}$ следует, что экономическая целесообразность варианта 4 автономного бестопливного энергоснабжения АГРС-ПН без дополнительных субсидий и налоговых льгот для принятых в примере условий возможна при $C_{\text{CO}_2}^{\text{налог}}$ равном 11,21 тыс. руб. за тонну. В случае же применения энергосберегающих инновационных технологий (вариант 6) безуглеродный ЭК предпочтителен как с экологической, так и экономической точки зрения.

Заключение

В диссертационной работе проведены исследования, направленные на совершенствование энергетических систем и комплексов с повышением термодинамической и технико-экономической эффективности и снижением вредного воздействия на окружающую среду. Решена актуальная научно-техническая задача разработки методики оценки эффективности автономных систем энергоснабжения АГРС-ПН на базе ДГА с использованием ВИЭ.

1. С учетом особенностей проектирования систем энергоснабжения газораспределительных станций в диссертационной работе разработан алгоритм и комплексная математическая модель расчета параметров технологически связанных элементов ЭК АГРС-НП. В отличие от известных, предложенная модель автономного ЭК базируется на балансе энергопотребления (на собственные нужды, на подогрев ПГ, затрат электроэнергии на привод ТНУ и насосов) и поступления энергии (от ВИЭ и ДГА). Данная модель позволяет выявить основные закономерности ЭК, обосновать выбор схемно-технологических решений, улучшающих технико-экономические показатели ЭК АГРС-НП.

2. На основе анализа теоретических исследований и проверки адекватности полученных результатов с помощью разработанной математической модели обосновано включение в схему при одноступенчатом ДГА пикового электроподогревателя (ПКТО), а также для устойчивой работы ЭК при малых расходах ПК в ночное время - аккумуляторной батареи (Патент № 2820371 Российская Федерация, МПК F01D 15/08 (2006.01), E02D 29/09 (2006.01). Газораспределительная станция с автономным бестопливным энергообеспечением и способ ее работы). Определены соотношения мощностей ТН и ПКТО, АБ при различных исходных параметрах АГРС-НП.

3. На основе результатов диссертационного исследования и анализа параметров, влияющих на работу ЭК, установлена возможность функционирования автономного ЭК АГРС-НП без использования органических видов топлива, выявлены критические режимы параметров ПГ и установлены граничные условия устойчивой работы ЭК АГРС-НП при различных исходных параметрах и схемных решениях.

4. По результатам исследований предложены алгоритм и методика оценки эффективности автономных ЭК АГРС-НП, направленные на выбор параметров и схем ЭК, позволяющие проектировать более экономичные и экологически более совершенные автономные системы энергоснабжения газораспределительных станций с использованием возобновляемых видов энергии.

5. Разработаны алгоритм и компьютерная программа, основанные на фундаментальных расчетных зависимостях, предлагаемых схемных решениях и результатах исследований. Разработанный программный продукт имеет свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2023612328 от 01.02.2023 г. Данная программа может найти практическое применение при проектировании и реконструкции действующих АГРС.

Таким образом, цель диссертационных исследований, заключающаяся в разработке методики оценки эффективности автономных систем энергоснабжения АГРС-НП на базе ДГА с использованием ВИЭ, позволяющей обосновать условия, при которых достигается устойчивая

и экономически эффективная работа ЭК АГРС-НП без применения для собственных нужд станции органических видов топлива, достигнута.

Научные публикации по теме диссертационного исследования

Научные статьи, опубликованные в журналах и изданиях, размещенных на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним:

1. Давыдов О.А. Тенденции развития энергетических систем газораспределительных станций / Аверьянов В.К., Давыдов О.А., Блинов А.Н., Анисимов С.М.//, Вестник гражданских инженеров №2 (73) 2019 г., стр. 122 – 130.

2. Давыдов О.А. Использование возобновляемых источников энергии и установок ожижения природного газа на газораспределительных станциях/ Аверьянов В.К., Давыдов О.А., Толмачев В.Н.//, Вестник гражданских инженеров №3 (74) 2019 г., стр. 142 – 151.

3. Давыдов О.А. Автономное энергоснабжение газораспределительной станции с использованием альтернативных источников энергии / Аверьянов В.К., Елистратов В.В., Давыдов О.А., Кирюхин С.Н.//, С.О.К., №11 (227), 2020 г.С.64-69.

4. Давыдов О.А. Автономное энергоснабжение автоматизированных газораспределительных станций нового поколения, / Аверьянов В.К., Елистратов В.В., Давыдов О.А., Кирюхин С.Н.// СОК № 12, 2021г. С.58-65.

5. Давыдов О.А. Диверсификация функций газораспределительных станций как способ повышения энергоэффективности и экологизации энергоносителей в газотранспортной системе / Аверьянов В. К., Блинов А.Н., Давыдов О.А., Самойлов Р.В.// Энергобезопасность и энергосбережение. – 2022 – № 4 – С. 32–38.

6. Давыдов О.А., Кирюхин С.Н. Имитационная модель энергетического комплекса автоматизированной газораспределительной станции нового поколения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612328 от 01.02.2023 г.

7. Давыдов О.А. Результаты оценки эффективности вариантов автономного энергоснабжения автоматизированных газораспределительных станций нового поколения / Лигачев А. В., Аверьянов В. К., Блинов А. Н., Кирюхин С. Н., Иваницкий С. С // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2024 – № 2 – С. 18–27.