МИНИСТЕРСТВО ЭКОЛОГИИ И ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Акционерное общество «Жасыл даму»

Отчет по обновлению инструментов моделирования и по анализу выбросов парниковых газов в сценарии декарбонизации

Астана, 2023 год

Лист согласования

Отчет по обновлению инструментов моделирования и по анализу выбросов ПГ в сценарии декарбонизации

№	ФИО	Должность	Подпись
1	Кабдолданов Нуржан Кенесбаевич	Заместитель Председателя Правления, член Правления АО «Жасыл даму»	
2	Насирхан Рустам	Директор департамента моделирования, анализа и прогнозирования АО «Жасыл даму»	
3	Бакдолотов Айдын Айсултанович	Менеджер департамента моделирования, анализа и прогнозирования АО «Жасыл даму»	
4	Оразханова Альфия Саматовна	Менеджер департамента моделирования, анализа и прогнозирования АО «Жасыл даму»	

Содержание

Список рисунков 123
Список таблиц 125
1. Введение в PyPSA 128
1.1. Данные модели PyPSA для сектора электроэнергетики 130
1.1.1. Управление рабочим процессом 130
1.1.2. Модель сетей и электростанций 135
1.1.3. Возобновляемые источники энергии 137
1.1.4. Метод пространственной кластеризации 139
1.1.5. Горизонт планирования 141
1.1.6. Интерфейс модели и модуля расчета 141
1.2. Сценарии развития электроэнергетики 142
1.2.1. Базовый сценарий 144
1.2.1. Сценарий углеродной нейтральности развития электроэнергетики 144
1.3. Моделирование сценариев 145
1.3.1. Математическая формулировка задачи 147
1.3.2. Результаты моделирования 150
1.4. Заключение 171
2. Введение в TIMES 172
2.1. Методы исследования 174
2.2. Формулировка сценариев выбросов парниковых газов 176
2.3. Общие предположения для всех сценариев 177
2.3.1. Базовый сценарий 178
2.3.2. Климатический сценарий 178
2.4. Анализ системы на чувствительность 179
2.5. Результаты моделирования климатического сценария 187
2.6. Производство электроэнергии 195
2.7. Производство теплоэнергии 202
2.8. Сектор промышленности 207
2.9. Транспортный сектор 215
2.10.Сектор жилищно-коммунального хозяйства 221

2.11.Сельское хозяйство 227
2.12.Сектор летучих эмиссий 231
3. Заключение 234
4. Список использованной литературы 242

Список рисунков

Рисунок 1.1.1. Пример правила Snakemake. 131
Рисунок 1.1.2. Направленный ациклический граф выполнения процессов для модели PyPSA Казахстан..... 132
Рисунок 1.1.3.Пример правила Snakemake с шаблонами подстановки. 133
Рисунок 1.1.4. Географическое расположение электрических сетей и генерации 136
Рисунок 1.1.5. Профиль суточного потенциала гидроэнергии Республики Казахстан на 2018 год. 137
Рисунок 1.1.6. Профиль суточного потенциала солнечной энергии Республики Казахстан на 2018 год. 138
Рисунок 1.1.7. Профиль суточного потенциала ветровой энергии Республики Казахстан на 2018 год 138
Рисунок 1.1.8 . Потенциал ветровой энергии. 139
Рисунок 1.1.9. Потенциал солнечной энергии. 139
Рисунок 1.1.10. Модель сетей Республики Казахстан после кластеризации 140
Рисунок 1.2.1. График изменения стоимости технологий 143
Рисунок 1.2.2. Прогноз потребления электроэнергии в Республике Казахстан. 144
Рисунок 1.3.1. Годовой объем выбросов CO_2 сектора электроэнергии в базовом сценарии. 150
Рисунок 1.3.2. Годовой объем выбросов CO2 сектора электроэнергии в сценарии углеродной нейтральности. 151
Рисунок 1.3.3. Оптимальные мощности технологий в базовом сценарии 153
Рисунок 1.3.4. Оптимальные мощности технологий в сценарии углеродной нейтральности..... 153
Рисунок 1.3.5. Снижение угольной генерации по областям в сценарии углеродной нейтральности 157
Рисунок 1.3.6. Производство электроэнергии в базовом сценарии 158
Рисунок 1.3.7. Производство электроэнергии в сценарии углеродной нейтральности. 158
Рисунок 1.3.8. Мощности OCGT в ЗКО в обоих сценариях 160
Рисунок 1.3.9. Мощности OCGT в Актюбинской области в обоих сценариях 160
Рисунок 1.3.10. Мощности OCGT в Карагандинской области в обоих сценариях 160
Рисунок 1.3.11. Мощности OCGT в Кызылординской области в обоих сценариях 160
Рисунок 1.3.12. Распределение мощностей водородных систем хранения по областям в сценарии углеродной нейтральности 161

Рисунок 1.3.13. Распределение мощностей аккумуляторных батарей по областям в сценарии углеродной нейтральности 162
Рисунок 1.3.14. Распределение мощностей ветряных электростанций по областям по возрастанию в сценарии углеродной нейтральности 163
Рисунок 1.3.15. Распределение мощностей солнечных электростанций по областям в сценарии углеродной нейтральности 164
Рисунок 1.3.16.Установленные мощности генерации по областям в 2060 году (базовый сценарий отсортирован от меньшего к большему). 166
Рисунок 1.3.17 Установленные мощности технологий хранения по областям в 2060 году (базовый сценарий отсортирован от меньшего к большему). 167
Рисунок 1.3.18 Оптимальное увеличение пропускной мощности линий электропередач между регионами в базовом сценарии. 168
Рисунок 1.3.19. Оптимальное увеличение пропускной мощности линий электропередач между регионами в сценарии углеродной нейтральности 168
Рисунок 1.3.20. Общие капитальные затраты в годовом исчислении. 169
Рисунок 1.3.21. Капитальные затраты на каждую технологию в базовом сценарии 170
Рисунок 1.3.22. Капитальные затраты на каждую технологию в сценарии углеродной нейтральности 170
Рисунок 2.1.1. Референтная энергетическая система (РЭС) 175
Рисунок 2.4.1. Выбросы парниковых газов по сценариям, млн тонн CO2-экв. 182
Рисунок 2.4.2. Выработка электроэнергии по сценариям, млрд квт*ч 183
Рисунок 2.4.3. Выработка электроэнергии по сценариям, по видам топлива и типам технологий, млрд квт*ч 184
Рисунок 2.5.1. Сценарии развития выбросов парниковых газов от сектора энергетики, МтCO2экв 189
Рисунок 2.6.1. Выбросы парниковых газов от сектора производства электроэнергии, МтCO2экв 196
Рисунок 2.6.2. Выработка электроэнергии, млдр квт*ч 198
Рисунок 2.6.3. Установленные мощности электростанций, ГВт 200
Рисунок 2.7.1. Сценарии развития выбросов парниковых газов в секторе производства теплоэнергии, МтCO2экв 204
Рисунок 2.8.1. Сценарии развития выбросов парниковых газов в секторе промышленности, МтCO2экв 209
Рисунок 2.8.2. Сценарии развития выбросов парниковых газов в секторе промышленности по отраслям, МтCO2экв 210
Рисунок 2.9.1. Сценарии развития выбросов парниковых газов в транспортном секторе, МтCO2экв 217

Рисунок 2.10.1. Сценарии развития выбросов парниковых газов в секторе жилищно-коммунального хозяйства, МтСО2экв 223
Рисунок 2.11.1. Выбросы в сельском хозяйстве в части сжигания топлива, МтСО2экв..... 229
Рисунок 2.12.1. Выбросы парниковых газов в секторе летучих эмиссий, МтСО2экв..... 232
Рисунок 2.12.2. Угольные бассейны Республики Казахстан и основные производственные площадки [Казэнерджи, 2021]..... 233

Список таблиц

Таблица 1.1.1. Сравнение функций различных программных инструментов, схожих с PyPSA [11]. 129
Таблица 1.1.1. Краткое описание правил Snakemake для модели PyPSA Республики Казахстан..... 133
Таблица 1.1.2. Обозначения регионов..... 140
Таблица 1.2.1. Прогнозируемые капитальные затраты на солнечные и ветровые электростанции и аккумуляторные батареи в базовом сценарии ($/МВт) 142
Таблица 1.2.2. Сценарий углеродной нейтральности..... 145
Таблица 1.3.1 Увеличение мощностей по областям в базовом сценарии 154
Таблица 1.3.2. Увеличение мощностей по областям в сценарии углеродной нейтральности..... 155
Таблица 1.3.3. Снижение угольных мощностей в сценарии углеродной нейтральности..... 156
Таблица 2.4.1. Предположения по ежегодным темпам реального роста валового внутреннего продукта в базовом сценарии и сценарии чувствительности 180
Таблица 2.4.2. Структура выработки электроэнергии по сценариям, по видам топлива и типам технологий, %..... 184
Таблица 2.5.1. Сценарии развития выбросов парниковых газов от сектора энергетики, МтСО2экв 190
Таблица 2.5.2. Общие поставки первичной энергии по видам топлива, тыс. тнэ 191
Таблица 2.5.3. Конечный спрос на энергию по секторам и по видам топлива, тыс. тнэ 193
Таблица 2.6.1. Выработка электроэнергии, млдр квт*ч..... 197
Таблица 2.6.2. Установленные мощности электростанций, ГВт 200
Таблица 2.7.1. Производство тепловой энергии по видам топлива, тыс. тнэ ... 204
Таблица 2.8.1. Выбросы парниковых газов от сжигания топлива в промышленности по отраслям, Мт CO2-экв. 210

Таблица 2.8.2. Конечный спрос на энергию в промышленности по видам топлива и отраслям, тыс. тнэ..... 211
Таблица 2.9.1. Потребление энергии по видам транспорта и видам топлива, тыс. тнэ 218
Таблица 2.10.1. Конечный спрос на энергию в зданиях по видам топлива и направлениям использования, тыс. тнэ..... 225
Таблица 2.11.1. Конечный спрос на энергию в сельском хозяйстве по видам топлива и отраслям, тыс. тнэ..... 229

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

МВт	-	Мегаватт
ГВтч	-	Гигаватт-час
КПД	-	Коэффициент полезного действия
кВтч	-	Киловатт-час
Гкал	-	Гигакалория
МЭА	-	Международное энергетическое агентство
ТЭБ	-	Топливно-энергетический баланс
т.у.т.	-	Тонн условного топлива
$м^3$	-	Кубический метр
СЦЛП	-	смешанное целочисленное линейное программирование
ВЛ	-	Высоковольтная линия
DCLF	-	Direct Current Load Flow
ПУЭ	-	Правила устройства электроустановок
ЕЭС	-	Едина електроенергетическая система
TIMES	-	The Integrated MARKAL-EFOM System
ТЭБ	-	Топливно-энергетический баланс
ВИЭ	-	Возобновляемые источники энергии
ТЭ	-	Транзактивная Энергия
ВВП	-	Валовый внутренний продукт

1. Введение в PyPSA

Python for Power System Analysis (PyPSA) — это набор программных инструментов на языке Python для анализа энергосистем [11]. PyPSA был разработан командой в Технологическом институте Карлсруэ (KIT), Карлсруэ, Германия, и сейчас PyPSA масштабировался и имеются различные участники по всему миру. Изначально на этом инструменте была разработана модель электроэнергетики и энергетики Европы, а сейчас ведутся активные работы по расширению модели на другие страны с учетом доступной информации, специфики экономики и энергосекторов стран.

В PyPSA уже включены модели традиционной генерации, переменной ветровой и солнечной генерации, различные технологии хранения электроэнергии, объединение с секторами природного газа, водорода, тепла и транспорта. PyPSA удобен тем, что все стадии решения оптимизационных задач транспарентны, каждый желающий может увидеть, какие данные берутся на входе и какие манипуляции с ними производятся. Также PyPSA хорошо масштабируется и поддерживает различные коммерческие и бесплатные пакеты для решения крупномасштабного линейного и квадратичного программирования.

PyPSA уже был применен для разработки и исследования модели европейского энергетического сектора для сравнения сценариев быстрого и медленного перехода на возобновляемые источники энергии [12], для моделирования сокращения энергопотребления зданий [13], тестирования новых методов управления умными электросетями [14].

Далее модель была расширена на Африку и мир, различные группы исследователей активно работают над разработкой моделей для других стран, включая США, Латинскую Америку и Казахстан и получила название PyPSA Earth [15]. Данное программное обеспечение сейчас покрывает все 193 государств-членов Организации Объединенных Наций. Для Республики Казахстан на данный момент существует рабочая модель PyPSA, которая базируется на открытых источниках – геопространственных данных со спутников, международных статистических агентств и свободного веб-картографического сервиса OpenStreetMaps. В PyPSA предусмотрены сценарии для прогнозирования изменения климата и роста на основе Shared Socioeconomic Pathways (SSP).

Целевая функция PyPSA Earth – оптимизация годовых капитальных затрат на выработку электроэнергии. В модели можно задавать различные ограничения, такие как лимиты выбросов CO2, доля возобновляемой энергетики, процент выработки электроэнергии каждого региона для собственных нужд, добавление требования по резерву мощностей и т.д.

Таблица 1.1.1. Сравнение функций различных программных инструментов, схожих с PyPSA [11].

				Анализ электрической сети				Экономический анализ							
	Программное обеспечение	**Версия**	**Бесплатное программное обеспечение**	**Power Flow**	**Continuation Power Flow**	**Dynamic Analysis**	**Transport Model**	**Linear OPF**	**SCLOPF**	**Nonlinear OPF**	**Multi-Period Optimisation**	**Unit Commitment**	**Оптимизация инвестиций**	**Другие сектора**
Инструменты электрической системы	MATPOWER	6	✓	✓	✓		✓	✓		✓				
	NEPLAN	5.5.8		✓		✓	✓	✓	✓	✓				✓
	pandapower	1.4.0	✓	✓			✓	✓		✓				
	PowerFactory	2017		✓		✓		✓	✓	✓				
	PowerWorld	19		✓		✓	✓	✓	✓	✓				
	PSAT	2.1.10	✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓		
	PSS/E	33.1		✓		✓		✓	✓	✓				
	PSS/SINCAL	13.5		✓		✓		✓		✓				✓
	PYPOWER	5.1.2	✓	✓			✓			✓				
	PyPSA	**0.11.0**	✓	✓			✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
Инструменты энергетической системы	calliope	0.5.2	✓				✓				✓		✓	✓
	minpower	4.3.10	✓				✓	✓			✓	✓		
	MOST	6	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		
	oemof	0.1.4	✓				✓				✓	✓	✓	✓
	OSeMOSYS	2017	✓				✓				✓		✓	✓
	PLEXOS	7.4					✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
	PowerGAMA	1.1	✓				✓	✓			✓			
	PRIMES	2017					✓	✓			✓	✓	✓	✓
	TIMES	2017					✓	✓			✓	✓	✓	✓
	urbs	0.7	✓				✓				✓	✓	✓	✓

В таблице выше представлено сравнение PyPSA с другими программными инструментами моделирования электричества и энергетики. Как мы видим, PyPSA универсален и имеет функционал, не уступающий коммерческим программным обеспечениям.

Главной задачей пользователя, способной улучшить точность моделей PyPSA для какой-либо страны, является предоставление достоверных данных и реалистичных сценариев. Для Республики Казахстан многие данные в ограниченном доступе, поэтому модель у разных пользователей может давать отличные друг от друга результаты. Тем не менее PyPSA хорошо подходит для сравнительного анализа различных сценариев развития страны и регионов.

В данной работе представлены результаты симуляции базового сценария и сценария декарбонизации электроэнергетики Республики Казахстан до 2060 года. Симуляция произведена для 2030, 2040, 2050 и 2060 годов. Для модели Республики Казахстан пока не разработана мультипериодная симуляция, поэтому результаты оптимизации предыдущего периода используются как исходные для текущего периода для связки периодов оптимизации.

1.1. Данные модели PyPSA для сектора электроэнергетики

1.1.1. Управление рабочим процессом

Управление рабочим процессом PyPSA-Earth осуществляется с помощью Snakemake - языка на основе Python и среды выполнения для рабочих процессов. Snakemake позволяет систематизировать и автоматизировать выполнение процессов через создание правил, где определены входящие и исходящие файлы для каждого процесса. Snakemake далее объединяет правила в цепочку для получения желаемого результата. Таким образом Snakemake помогает разрабатывать устойчивое программное обеспечение, которое обеспечивает воспроизводимую, адаптируемую и прозрачную работу.

PyPSA-Earth был реализован как отдельный набор правил в Snakemake, и для Республики Казахстан были добавлены уникальные правила для форсирования определенных ограничений на модели нагрузки и линий передачи. Пользователь PyPSA-Earth может запустить модель с помощью одной строки кода и получить необходимый результат. Разделение всего процесса на более мелкие правила позволяет пользователю легче взаимодействовать с моделью и вносить изменения при необходимости.

Все конфигурации для запуска Snakemake указываются в файле под названием config {}.yaml. Для разных запусков можно создать разные файлы конфигураций, что позволяет модифицировать параметры без модификации самих кодов. Каждое правило Snakemake состоит из нескольких базовых блоков, описанных на снимке ниже.

```
# Назнание правила
rule build_osm_network:

    # Вводные данные
    input:
        generators="resources/" + RDIR + "osm/clean/all_clean_generators.geojson",
        lines="resources/" + RDIR + "osm/clean/all_clean_lines.geojson",
        substations="resources/" + RDIR + "osm/clean/all_clean_substations.geojson",
        country_shapes="resources/" + RDIR + "shapes/country_shapes.geojson",

    # Результаты правила
    output:
        lines="resources/" + RDIR + "base_network/all_lines_build_network.csv",
        converters="resources/" + RDIR + "base_network/all_converters_build_network.csv",
        transformers="resources/"
        + RDIR
        + "base_network/all_transformers_build_network.csv",
        substations="resources/" + RDIR + "base_network/all_buses_build_network.csv",

    # Лог файлы, где записываются все произведенные действия
    log:
        "logs/" + RDIR + "build_osm_network.log",

    # Опция для фиксирования времени выполнения правила
    benchmark:
        "benchmarks/" + RDIR + "build_osm_network"

    # Название кода Python, необходимого для получения результатов
    script:
        "scripts/build_osm_network.py"
```

Рисунок 1.1.1. Пример правила Snakemake.

Чтобы правило было успешно выполнено, необходимо наличие указанных вводных данных и кода Python, который может произвести перечисленные результаты. Если вводных данных нет в указанной локации на компьютере или сервере, то Snakemake ищет, есть ли правила, способные создать такой файл. Если правило найдено, то Snakemake ставит его в очередь выполнения задач перед тем правилом, которое использует его результат. Таким образом создается направленный ациклический граф процесса, согласно которому выполняются работы. Если какое-либо из правил создает цикличность, выполнение процесса будет невозможно. Граф выполнения симуляции для Республики Казахстан показан на рисунке ниже.

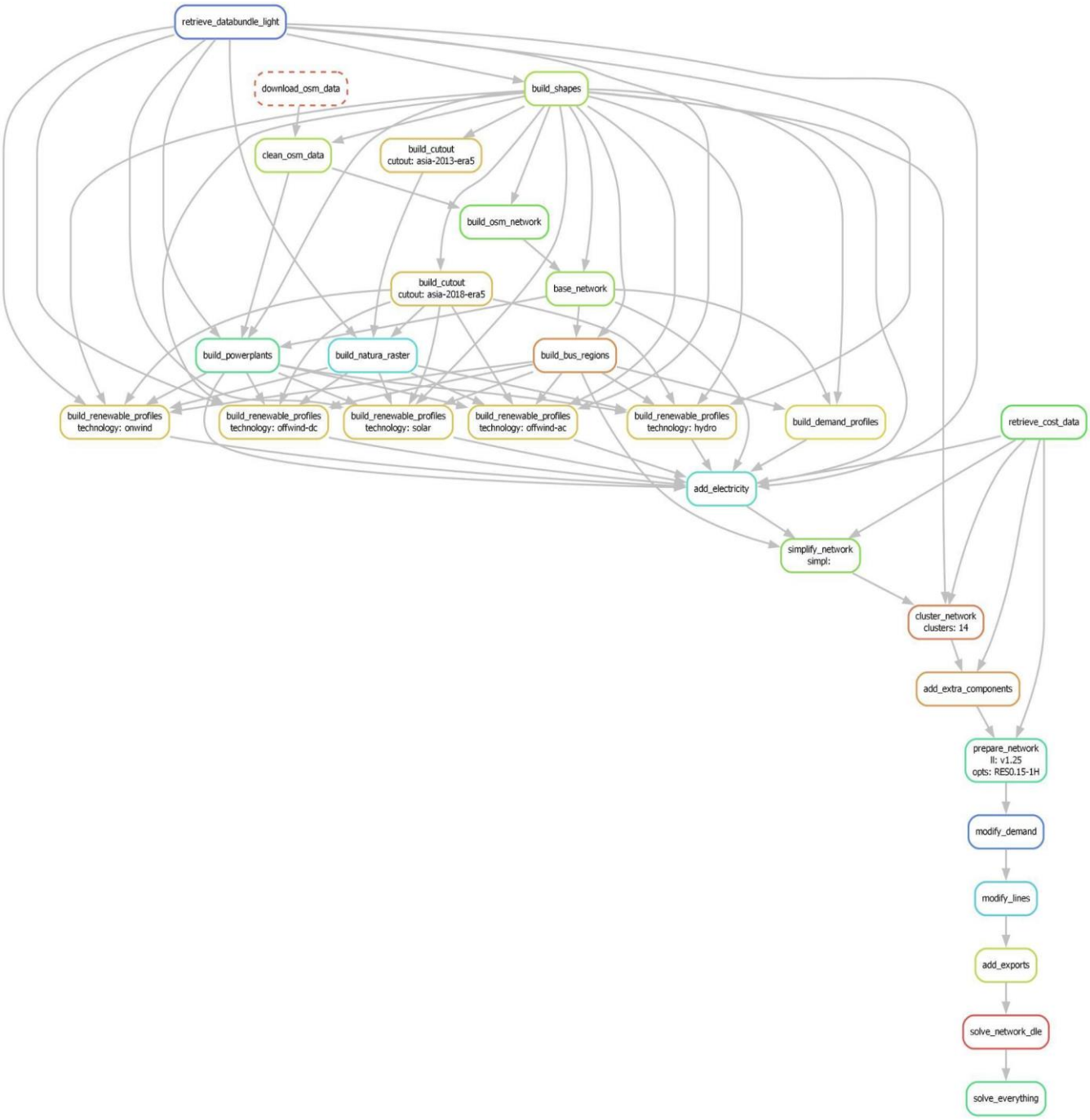


Рисунок 1.1.2. Направленный ациклический граф выполнения процессов для модели PyPSA Казахстан

Также в описании правил могут использоваться шаблоны постановки, позволяющие разделять результаты запусков с различными конфигурациями. Конфигурации, которые могут быть заданы таким образом, включают: количество узлов для предварительного упрощения системы, количество кластеров, лимиты по расширению линий электропередач, различные опции для оптимизации, например, шаг симуляции, требования по доле возобновляяемых источников энергии, снижению выбросов и т.д. Пример правила с шаблонами подстановки показан ниже. Шаблоны подстановки выделяются синим и берутся

в фигурные скобки. При запуске Snakemake, на место этих шаблонов будут подставлены необходимые значения.

```
rule solve_all_networks:
    input:
        expand(
            "results/" + RDIR + "networks/elec_s{simpl}_{clusters}_ec_l{ll}_{opts}.nc",
            **config["scenario"]
        ),
```

Рисунок 1.1.3.Пример правила Snakemake с шаблонами подстановки.

Всего процесс включает в себя 28 задач. Количество задач может меняться, если вводные данные для какого-либо правила уже доступны или если какие-либо правила отключены через файл конфигурации. Все правила можно поделить на условные 4 категории: извлечение данных, создание модели электрических сетей, упрощение модели, решение модели. Так как некоторые данные при создании модели для Республики Казахстан не отражают действительность, перед решением модели запускаются специальные правила для модели Республики Казахстан. Краткое описание всех правил представлено в таблице ниже.

Таблица 1.1.1. Краткое описание правил Snakemake для модели PyPSA Республики Казахстан.

Извлечение данных	retrieve_cost_data	Данные правила обеспечивают наличие нужных исходных данных (из интернета или копируют из существующих папок)
	retrieve_databundle_light	
	download_osm_data	
Создание модели электрических сетей	clean_osm_data	Стандартизирует и чистит данные
	build_shapes	Строит границы страны и административных регионов, добавляет данные о населении и валовом внутреннем продукте для прогнозирования
	build_osm_network	Линии электропередач из открытых источников
	build_cutout cutout: asia-2013-era5	Данные о климате из Copernicus Climate Data Store
	build_cutout cutout: asia-2018-era5	

	base_network	Создает топологию электросети
	build_powerplants	Добавляет модели генераторов в сеть
	build_demand_profiles	Добавляет модель нагрузки в сеть
	build_natura_raster	Добавляет растровые изображения поверхности для определения зон, где возможно строительство новых станций и сетей
	build_bus_regions	Создает области Вороного для каждой шины, представляющие как сухопутные, так и прибрежные регионы.
	build_renewable_profiles technology: hydro	Рассчитывает на основе пакета Atlite для каждого узла сети (i) установленную мощность (на основе землепользования), (ii) доступный временной ряд выработки электроэнергии (на основе погодных данных) и (iii) среднее расстояние от узла для наземных и морских ветровых установок прямого и переменного тока и солнечных фотоэлектрических генераторов.
	build_renewable_profiles technology: offwind-ac	
	build_renewable_profiles technology: offwind-dc	
	build_renewable_profiles technology: onwind	
	build_renewable_profiles technology: solar	
	add_electricity	Добавляет существующие генерацию и технологии хранения в модель сети
Упрощение модели	simplify_network simpl:	Преобразует передающую сеть в сеть, эквивалентную 380 кВ
	cluster_network clusters: 14	Использует метод кластеризации на основе k-средних (k-means) для разделения сети на заданное количество зон, а затем сводит сеть к представлению с одной шиной на зону
	add_extra_components	Позволяет добавлять дополнительные компоненты
	prepare_network ll: v1.25 opts: RES0.15-1H	Подготавливает модель к решению с различными параметрами

Правила для модели KZ	modify_demand	Перераспределяет нагрузку по регионам Республики Казахстан согласно данным базового года
	modify_lines	Применяет максимальные лимиты на линии
	add_exports	Добавляет экспортируемую и импортируемую электроэнергию в модель
Решение модели	solve_network_dle	Решает модель
	solve_everything	Запускает полную цепочку процесса

Разделение процесса на правила помогает понять последовательность выполнения действий и определить, какие правила необходимо модифицировать для внесения изменений. Для моделирования различных сценариев будут меняться только вводные данные, которые задаются через файл конфигураций и правила извлечения данных.

1.1.2. Модель сетей и электростанций

Модель сетей Республики Казахстан состоит из высоковольтных линий электропередач различного напряжения: 500кВ, 220кВ, 110 кВ, а также одной линии, пересекающей северный Казахстан, номиналом 1150 кВ. Западная зона - Атырауская, Мангыстауская и Западно-Казахстанская области, на данный момент изолирована от других. Поставки электроэнергии в этот регион происходят за счет собственной генерации и импорта из России. Модели сетей в PyPSA- Earth моделируются из открытого источника OpenStreetMaps, тем не менее хорошо повторяют модель имеющихся электросетей. В будущем, можно вручную внести данные о линиях электропередач для достоверности информации. На Рисунке ниже представлена полученная модель линий и генерации Республики Казахстан.

Данные о генерации для Республики Казахстан собраны в отдельном файле “custom_powerplants.csv”. Основные данные, которые должен содержать этот файл: наименование, тип станции, тип топлива, мощность, год ввода и вывода из эксплуатации, страна, долгота и широта для соединения с линиями электропередач и последующей кластеризации. Также можно добавить данные о производительности, даты модернизации, привязать станцию к определенному узлу. В файле можно указывать как имеющиеся, так и планируемые станции.

Следующие типы генерации были добавлены в модель:

- угольные электростанции (coal)
- газовые электростанции открытого цикла (OCGT)
- газовые электростанции комбинированного цикла (CCGT)

- гидроэлектростанции (run of river – RoR)
- ветровые электростанции (wind)
- солнечные электростанции (solar).

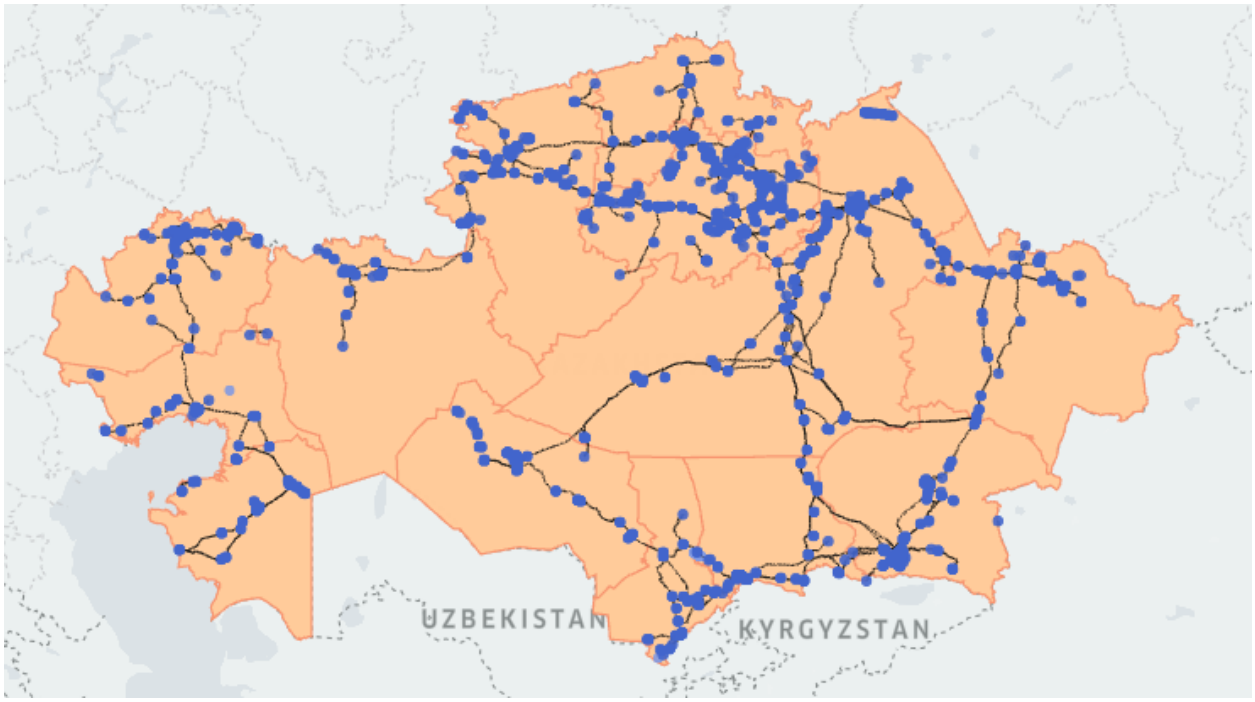


Рисунок 1.1.4. Географическое расположение электрических сетей и генерации

Из перечисленных типов электростанций, только угольные и газовые производят выбросы CO2, а остальные типы относятся к возобновляемым источникам энергии. В целях оптимизации, технологии OCGT, ветровых и солнечных электростанций отмечены, как доступные к расширению, то есть новые мощности могут быть добавлены в решении оптимизационной задачи. Угольные электростанции, CCGT и гидроэлектростанции не могут быть увеличены в мощностях по следующим причинам: угольные из-за требования перехода на более чистые источники энергии, CCGT из-за того, что данная технология уступает по характеристикам OCGT, по гидроэлектростанциям предполагается, что уже потенциал достигнут. Данные предположения заложены в модель PyPSA-Earth для всех стран и регионов. Чтобы изменить эти предположения необходимо редактировать исходные коды, что возможно в дальнейшей работе с PyPSA.

Технологии хранения электроэнергии в модели присутствуют трех типов: гидрохранилища, определенные мощности которых уже установлены на территории Республики Казахстан и не поддаются увеличению, как и гидроэлектростанции, аккумуляторные батареи, которые в масштабах страны пока не присутствуют в электрических сетях и доступны в модели для установки, водородные хранилища для сценария декарбонизации.

Математические модели и ограничения для каждого типа генерации и хранения представлены в Главе 1.3.1.

1.1.3. Возобновляемые источники энергии

Возобновляемые источники энергии, такие как временные ряды солнечной, ветровой и гидроэнергии, моделируются с помощью пакета с открытым исходным кодом Atlite. Atlite (i) создает сектора, которые определяют пространственно-временные границы, (ii) подготавливает сектора, добавляя данные об окружающей среде и погоде к геопространственным границам путем сопоставления различных баз данных (данные реанализа ERA5, спутниковые данные SARAH-2, и батиметрия GEBCO), и, наконец, (iii) применяет функции преобразования для получения временных рядов и потенциалов с пространственным разрешением для конкретных технологий.

В моделировании используются данные 2018 года как базового. С помощью модуля Atlite модель получает почасовые временные ряды профилей потенциалов солнечной и ветровой энергии для каждого узла, или области при кластеризации по областям. Для упрощения на графиках ниже представлены среднее, максимальное и минимальное значения суммарного суточного потенциала по всей стране. Для солнечной и гидроэнергии заметна сезонность по временам года с увеличением летом и уменьшением зимой, что является ожидаемым для данных возобновляяемых источников энергии. Для ветровой энергии в 2018 году нет четкого паттерна, кроме уменьшения потенциала в летнее время.

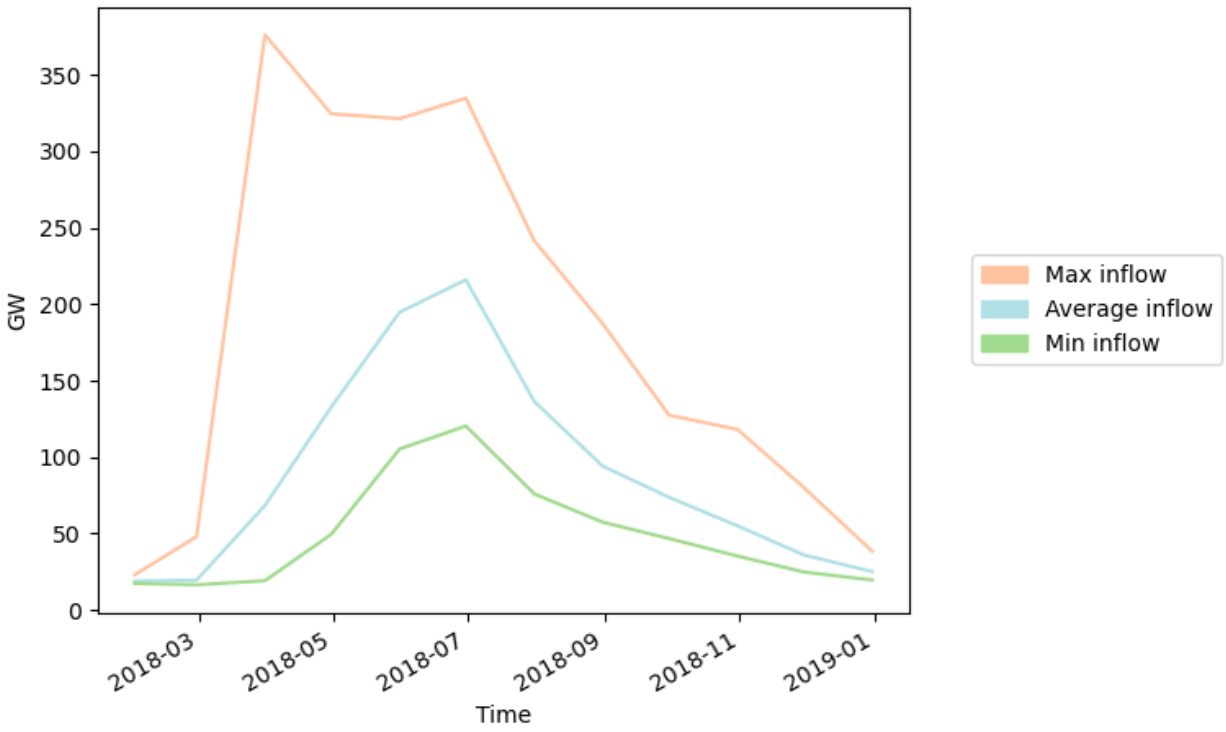


Рисунок 1.1.5. Профиль суточного потенциала гидроэнергии Республики Казахстан на 2018 год.

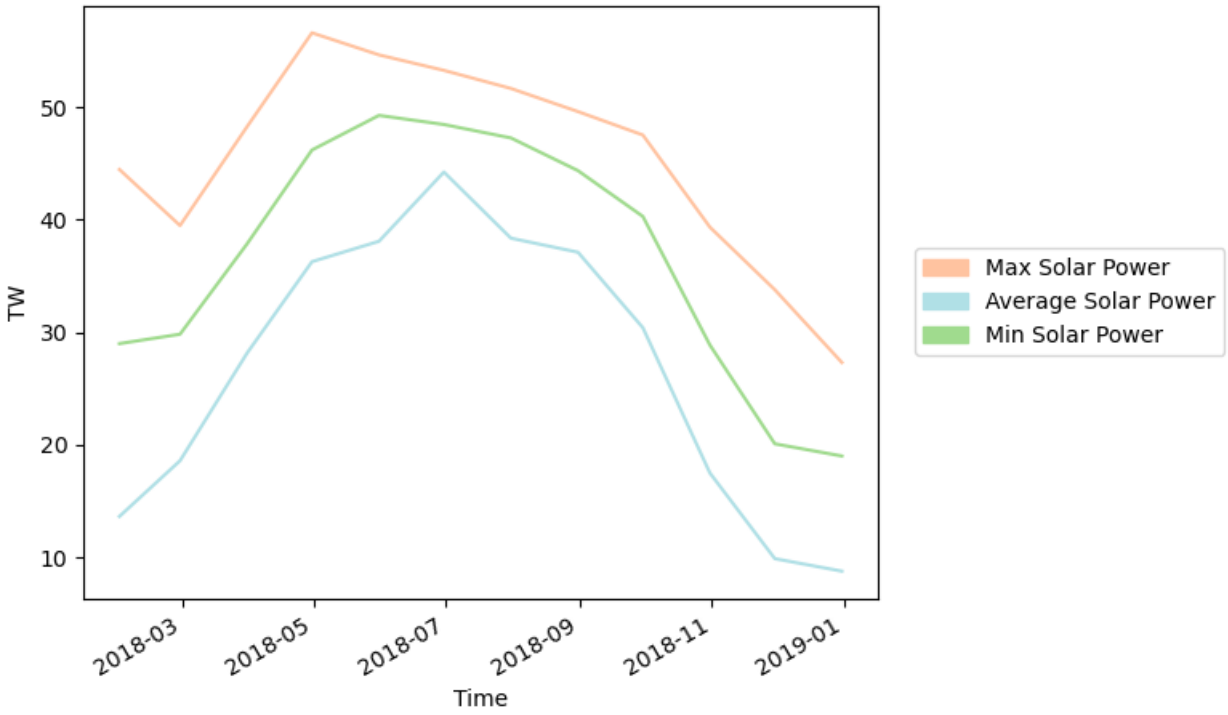


Рисунок 1.1.6. Профиль суточного потенциала солнечной энергии Республики Казахстан на 2018 год.

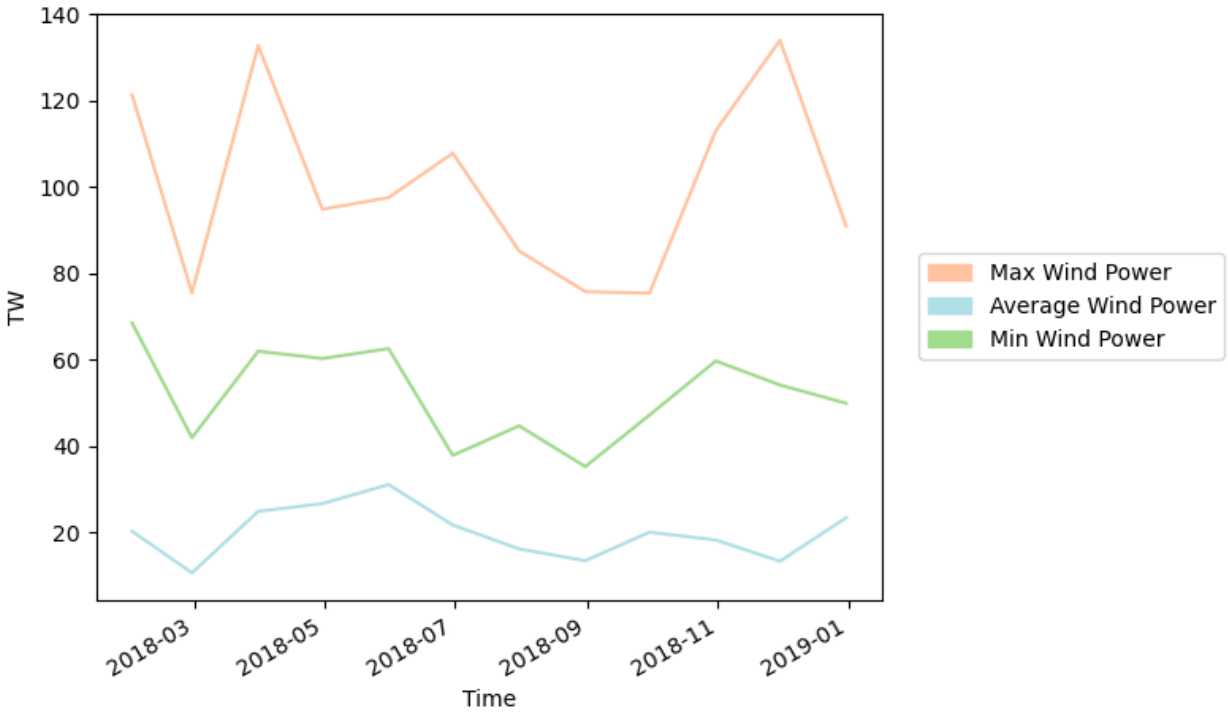


Рисунок 1.1.7. Профиль суточного потенциала ветровой энергии Республики Казахстан на 2018 год

На рисунках ниже представлены потенциалы солнечной и ветровой энергии по стране с географическим разрешением примерно 20x20 км^2 на базе данных реанализа ERA5. Белые пятна показывают зоны, где невозможна установка новых мощностей солнечной и ветровой энергии из-за присутствия

там водоемов, национальных парков, лесов и других территорий, непригодных для строительства. Оба показателя представлены, как максимальная устанавливаемая мощность в каждой ячейке.

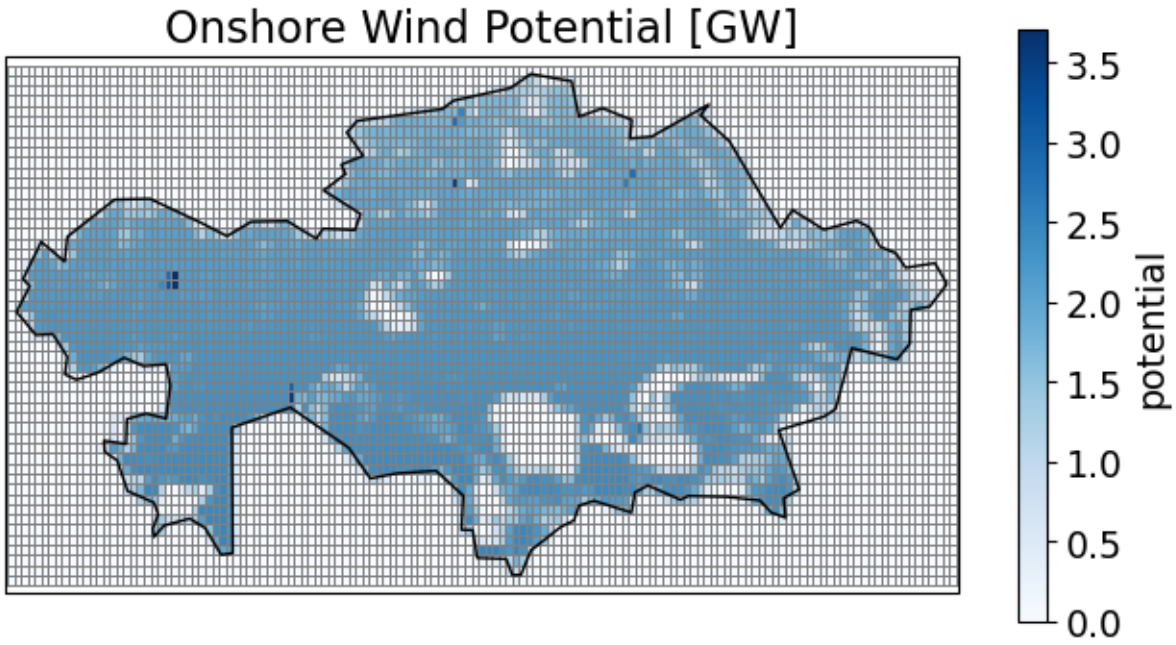


Рисунок 1.1.8 . Потенциал ветровой энергии.

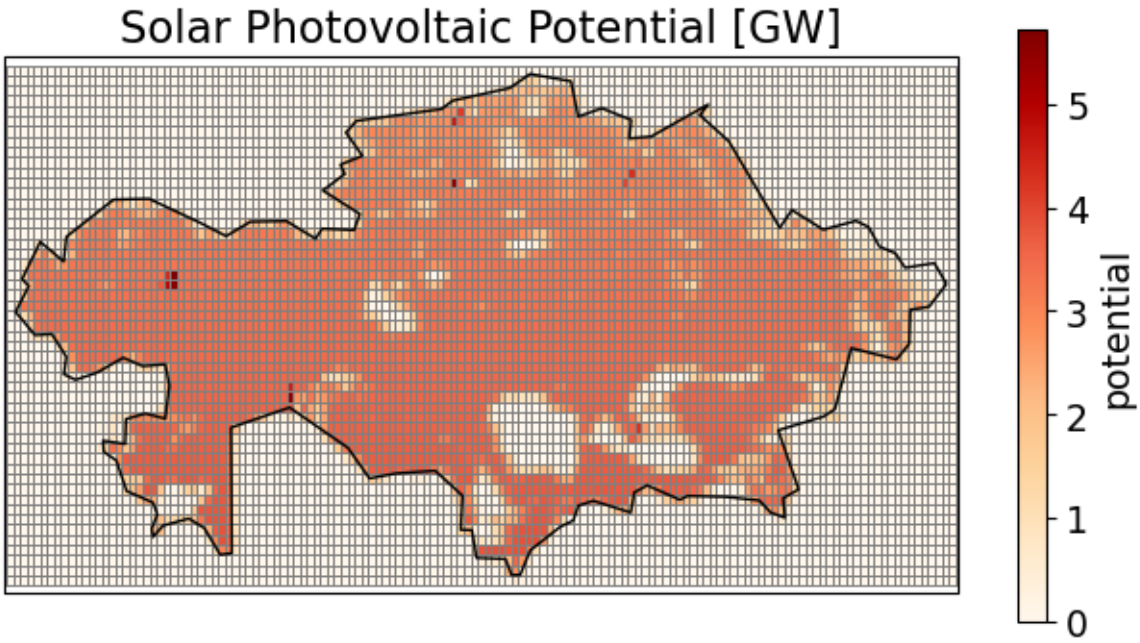


Рисунок 1.1.9. Потенциал солнечной энергии.

1.1.4. Метод пространственной кластеризации

В целях моделирования энергосистема Республики Казахстан кластерирована на 14 кластеров, учитывая административное деление на базовый 2018 год. Для кластеризации используется широко известный алгоритм

k-средних (k-means), который минимизирует суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центров кластеров.

Каждая область соединена с соседними существующими электросетями, пропускная способность которых ограничена согласно параметрам линий электропередач. Рисунок 1.1.10 показывает упрощенную модель электросетей Республики Казахстан после кластеризации. Номера показывают номера линий передач, а Таблица 1.1.2 показывает соотношение узлов и областей или стран. Как мы видим, Западный Казахстан изолирован от других регионов и согласно модели самодостаточен. Географическая локация центров кластеров и соответственно линий была определена с помощью алгоритма. Как можно наблюдать, линии передач после кластеризации приближенно повторяют форму основных магистралей электропередачи по Республике Казахстан.

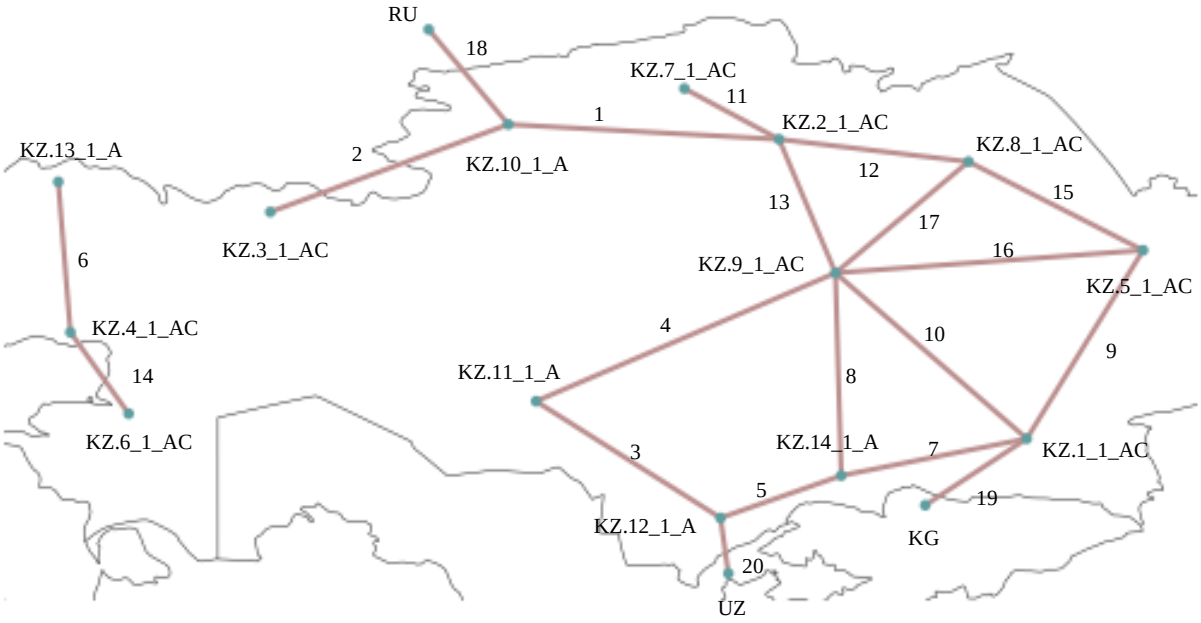


Рисунок 1.1.10. Модель сетей Республики Казахстан после кластеризации

Таблица 1.1.2. Обозначения регионов

Обозначение узла	Регион
KZ.1_1_AC	Алматинская область
KZ.2_1_AC	Акмолинская область
KZ.3_1_AC	Актюбинская область
KZ.4_1_AC	Атырауская область
KZ.5_1_AC	Восточно-Казахстанская область
KZ.6_1_AC	Мангыстауская область
KZ.7_1_AC	Северо-Казахстанская область
KZ.8_1_AC	Павлодарская область
KZ.9_1_AC	Карагандинская область

KZ.10_1_AC	Костанайская область
KZ.11_1_AC	Кызылординская область
KZ.12_1_AC	Туркестанская область
KZ.13_1_AC	Западно-Казахстанская область
KZ.14_1_AC	Жамбылская область
RU	Россия
UZ	Узбекистан
KG	Кыргызстан

1.1.5. Горизонт планирования

В PyPSA горизонт оптимизации задается через файл конфигураций. Срез горизонта планирования может варьироваться от одного дня до года, а временной шаг от одного часа до одних суток. Это дает большую гибкость при моделировании и решении оптимизации, так как пользователь может проверить перед запуском модель с большими временными шагами (например, шесть часов) и небольшим горизонтом планирования, что значительно ускоряет процесс оптимизации. В данной работе использовано максимальное временное разрешение с горизонтом планирования 1 год и временным шагом в 1 час.

Для многопериодной оптимизации в данной работе каждый срез для 2030, 2040, 2050, 2060 годов будет моделирован отдельно от другого с сохранением глобальных ограничений для достижения согласованности результатов моделирования каждого года. Также результаты моделирования предыдущего периода (установленные мощности технологий и пропускные мощности линий электропередач) будут использоваться как исходные данные для следующего периода.

1.1.6. Интерфейс модели и модуля расчета

Модель PyPSA-Earth объединяет структуру модели PyPSA с интерфейсами программных обеспечений для решения оптимизационных задач для выполнения исследований по планированию. Использование PyPSA имеет ряд преимуществ по сравнению с другими инструментами, которые кратко представлены ниже. Во-первых, PyPSA позволяет масштабировать задачи оптимизации на Python. Python хорошо известен своим удобством для пользователя, но при анализе потребления памяти и скорости решения задач оптимизации он был признан неконкурентоспособным по сравнению с инструментами на основе языка программирования Julia или C++. Для решения этой задачи был разработан пакет Linopy, который увеличивает скорость выполнения задач и улучшает потребление памяти на 50% по сравнению с формулировщиком задач оптимизации Pyomo, использованным ранее в PyPSA. Еще один момент, делающий PyPSA привлекательным для моделирования, заключается в том, что это один из самых популярных инструментов для энергосистем в открытом доступе, использующий стандартные объект-

компоненты и имеющий непрерывно поддерживаемую документацию. Наконец, инфраструктура на основе Linopy совместима с несколькими программными обеспечениями для решения оптимизационных задач, как с открытым исходным кодом, так и коммерческими (HiGHS, IBM CPLEX, Cbc, GLPK, Gurobi и др). В решении базового сценария для этой работы было использовано программное обеспечение IBM CPLEX, обеспечивающее быстрое и точное решение оптимизационных задач.

1.2. Сценарии развития электроэнергетики

PyPSA уже имеет встроенные сценарии на основе SSP. Для Республики Казахстан применены средние темпы роста и не учтены задачи, поставленные перед сектором электроэнергетики на 2030 год по доле возобновляяемых источников энергии. В связи с этим сценарии моделирования были изменены. Первый - базовый сценарий развития электроэнергетики, если Казахстан не будет внедрять дальнейшие стратегии по изменению климата и цели декарбонизации, помимо существующих. Второй – сценарий углеродной нейтральности, в котором к 2060 году Казахстан обязуется сократить полностью выбросы парниковых газов. Каждый сценарий описан детальнее далее в отчете. В данной главе представлены параметры, общие для базового сценария и сценария углеродной нейтральности.

Моделируемые сценарии предполагают медленное снижение цен на технологии хранения электроэнергии для электросетей, солнечных панелей и ветровых электростанций. В

Таблица 1.2.1 и Рисунок 1.2.1 показаны тренды изменения цен:

Таблица 1.2.1. Прогнозируемые капитальные затраты на солнечные и ветровые электростанции и аккумуляторные батареи в базовом сценарии ($/МВт)

Год	Солнечные электростанции	Ветровые электростанции	Аккумуляторные батареи	Водородные системы
2030	720 000	1 228 000	745 946	756 000
2040	520 000	1 163 000	634 234	641 250
2050	371 429	1 098 000	544 144	621 000
2060	300 000	1 033 000	536 937	621 000

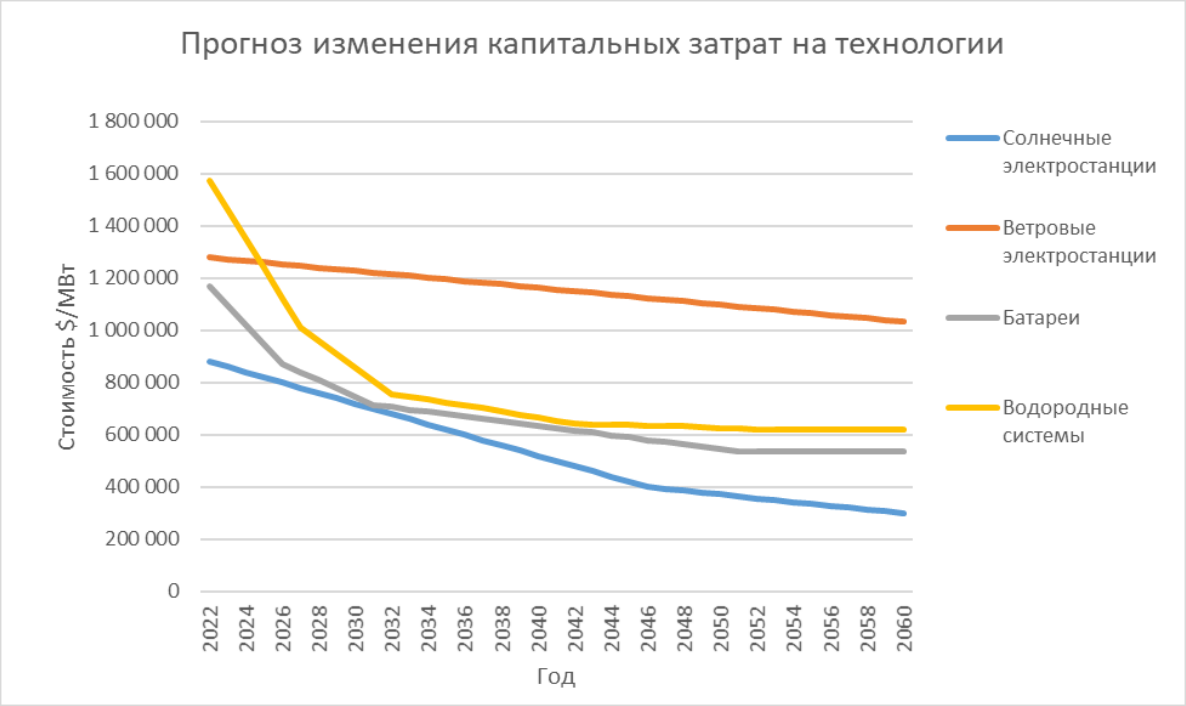


Рисунок 1.2.1. График изменения стоимости технологий

Уровень выбросов парниковых газов на 1990 равнялся 386,3 млн. тонн CO_2-экв, что берется как базовый уровень выбросов (БУВ). На долю электроэнергетики приходится треть этих выбросов – 128,7 млн. тонн CO_2-экв. На данный момент в модели PyPSA нет возможности задавать значения выбросов каждой электростанции. Для расчета годового количества выбросов берется среднее значение для того или иного топлива. Коэффициенты выбросов CO_2 были рассчитаны на основе данных Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан и составили 0.275 тонн CO_2-экв./МВт*ч для угля и 0.201 тонн CO_2-экв./ МВт*ч для газа.

В модели был предусмотрен вариант расширения пропускной способности линий электропередач путем оптимизации их стоимости. При этом PyPSA только увеличивает пропускную способность там, где уже есть линии электропередач, но не предлагает строительство совершенно новых связей между кластерами. Для моделирования создания связи между кластерами пользователь должен задать необходимые параметры вручную. Таким образом, кластеризация, представленная на Рисунок 1.1.10, сохраняется для обоих сценариев и для всех годов симуляции.

Газификация регионов будет проходить поэтапно в обоих сценариях:

- Акмолинская область, 2024г.
- Карагандинская область, 2024г.
- Северо-Казахстанская область, 2026г.
- Павлодарская область, 2032г.
- Восточно-Казахстанская область после 2040 г.

1.2.1. Базовый сценарий

На данный момент в стратегии государства предусмотрено снижение выбросов парниковых газов согласно Парижскому соглашению на 15% от уровня 1990 года к концу 2030 года. На основе этих обязательств в сценариях низкоуглеродного развития предусмотрено повышение доли возобновляемых источников энергии в секторе энергетики до 15% к 2030 году, а также сокращение выбросов в том числе за счет снижения потребления угля. Для других годов лимиты по выбросам в оптимизации не установлены, так как электрификация энергетики может привести к миграции выбросов из других секторов энергетики в электроэнергетику. Также в базовом сценарии не учтены цели снижения потребления угля до 40% к концу 2030 года, заявленные на COP26.

Рост потребления в базовом сценарии спрогнозирован, используя эконометрический подход, где потребление энергии прогнозируется как функция валового внутреннего продукта до 2035 года, и далее применен линейный рост. В базовом сценарии мы не учитываем электрификацию экономики, поэтому прогнозируется плавный рост потребления электричества. Тем не менее, в 2060 году потребление увеличится на 97% в базовом сценарии относительно 2018 года.

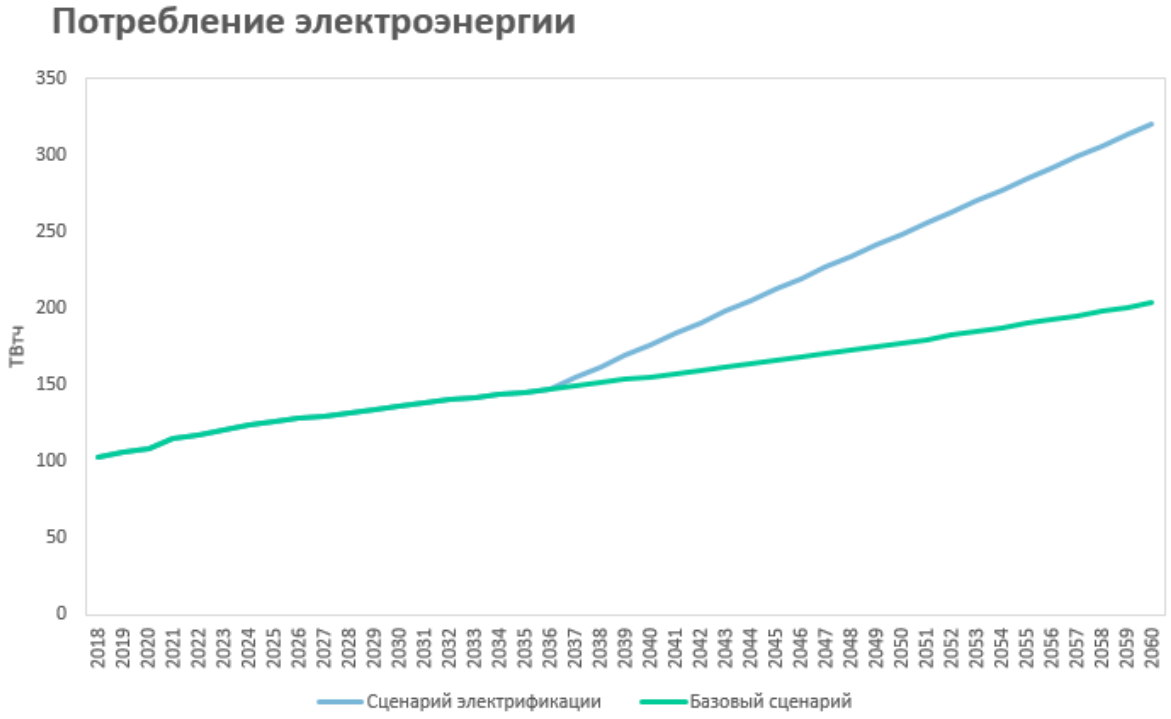


Рисунок 1.2.2. Прогноз потребления электроэнергии в Республике Казахстан.

1.2.1. Сценарий углеродной нейтральности развития электроэнергетики

В сценарии углеродной нейтральности предусмотрен значительный рост потребления электричества за счет электрификации транспорта, отопления и

других секторов. Сценарий электрификации показан на Рисунок 1.2.2. Относительно 2018 года рост потребления электроэнергии прогнозируется утроиться к 2060 году. Таблица 1.2.2 показывает основные параметры для симуляции сценария углеродной нейтральности, задаваемые в PyPSA.

Таблица 1.2.2. Сценарий углеродной нейтральности

Показатель / Год	Потребление электроэнергии, ТВтч	Снижение выбросов CO_2, % от 1990 года	Доля возобновляемых источников энергии от общего электропотребления
2030	136	15%	15%
2040	156	40%	40%
2050	178	70%	
2060	203	100%	

Стоимость технологий и коэффициенты выбросов заданы такие же, как для базового сценария. В данном сценарии помимо аккумуляторных батарей, также добавлены водородные хранилища. Вариант строительства атомной электростанции не рассмотрен, так как в модели PyPSA не предусмотрена оптимизация атомной генерации, ее необходимо изучать отдельно.

1.3. Моделирование сценариев

PyPSA способен решать линейные оптимизационные проблемы оптимального потока мощности (Linear Optimal Power Flow - LOPF) и LOPF, ограниченного безопасностью (Security Constrained LOPF - SCLOPF). В данной работе модель была сформулирована как LOPF. Вводные данные для LOPF перечислены ниже с их обозначениями в коде Python:

- network.{snapshot_weightings} – вес каждого временного интервала в целевой функции
- bus.{v_nom, carrier} – для узлов номинальный вольтаж и тип тока прямой или переменный
- load.{p_set} – потребление активной мощности
- generator.{p_nom, p_nom_extendable, p_nom_min, p_nom_max, p_min_pu, p_max_pu, marginal_cost, capital_cost, efficiency, carrier} – для генераторов номинальная мощность, возможность увеличения мощности, верхний и нижний лимиты по номинальной генерации, минимальная и максимальная мощности в интервал времени, предельные и капитальные затраты на данный тип генерации на МВтч, производительность, источник энергии.
- storage_unit.{p_nom, p_nom_extendable, p_nom_min, p_nom_max, p_min_pu, p_max_pu, marginal_cost, capital_cost, efficiency, standing_loss, inflow, state_of_charge_set, max_hours, state_of_charge_initial, cyclic_state_of_charge} - для систем хранения электроэнергии номинальная мощность, возможность

увеличения мощность, верхний и нижний лимиты по номинальной мощности, минимальная и максимальная мощности в интервал времени, предельные и капитальные затраты на данный тип хранения на МВтч, производительность, потери при наличии заряда, приток, значения уровня заряда для каждого интервала для запуска оптимизации, максимальное время хранения электроэнергии, начальные значения заряда, цикличность уровня заряда.

- line.{x, s_nom, s_nom_extendable, s_nom_min, s_nom_max, capital_cost}, transformer.{x, s_nom, s_nom_extendable, s_nom_min, s_nom_max, capital_cost} – для линий электропередач и трансформаторов реактивное сопротивление, предел полной мощности, возможность увеличения мощности, нижний и верхний лимиты увеличения полной мощности линий, капитальная стоимость.
- carrier.{carrier_attribute} – источник энергии и его атрибуты.
- global_constraint.{type, carrier_attribute, sense, constant} – для каждого глобального ограничения тип ограничения, какие атрибуты задействованы, знак сравнения (больше, меньше или равно) и константа.

Далее будут представлены целевая функция и ограничения в виде линейных равенств и неравенств. Результатом оптимизации является следующий набор переменных:

- bus.{v_mag_pu, v_ang, p, marginal_price} – амплитуда и угол напряжения, почасовая мощность, локальная предельная цена электричества на каждом узле.
- load.{p} – почасовая потребность.
- generator.{p, p_nom_opt} – для каждого типа генерации на узле почасовая выработка электричества и оптимальная номинальная мощность.
- storage_unit.{p, p_nom_opt, state_of_charge, spill} - почасовая выработка электричества, оптимальная номинальная мощность, уровень заряда и переполнение технологий хранения на узле.
- line.{p0, p1, s_nom_opt, mu_lower, mu_upper} – для линий передачи мощности на обоих концах, оптимальная пропускная способность в МВА, нижняя и верхняя граница теневой цены.
- transformer.{p0, p1, s_nom_opt, mu_lower, mu_upper} – для трансформаторов входящее и исходящее напряжение, пропускная способность в МВА, нижняя и верхняя граница теневой цены.
- global_constraint.{mu} – теневая цена глобального ограничения оптимизации.

Таким образом, PyPSA способен оптимизировать обширный ряд переменных, которые помогут моделистам и лицам, принимающим решения, выработать наиболее эффективный сценарий декарбонизации в дальнейшем.

1.3.1. Математическая формулировка задачи

Модуль PyPSA включает в себя коды для формулировки задачи линейного математического программирования. Все вводные данные готовятся на начальных этапах (см.

Таблица 1.1.1), а переменные, контролируемые пользователем, задаются в файле конфигураций. В зависимости от конфигураций модель будет включать в себя те или иные ограничения и параметры модели.

a. Целевая функция

Целевая функция состоит из капитальных затрат на каждый компонент и эксплуатационных затрат на генераторы:

$$\min_{\bar{g},\bar{h},F,g,h} \ \sum_{n,s} c_{n,s}\bar{g}_{n,s} + \sum_{n,s} c_{n,s}\bar{h}_{n,s} + \sum_{l} c_l F_l + \sum_{t} w_t\left[\sum_{n,s} o_{n,s,t} g_{n,s,t} + \sum_{n,s} o_{n,s,t} h_{n,s,t}\right] + \sum_{t} \left[suc_{n,s,t} + sdc_{n,s,t}\right] \quad (1)$$

Где:

$n \in N = \{0, \dots |N| - 1\}$ – индексы узлов

$t \in T = \{0, \dots |T| - 1\}$ – индексы времени

$l \in L = \{0, \dots |L| - 1\}$ – индексы линий электропередач

$s \in S = \{0, \dots |S| - 1\}$ – индексы различных генераторов и технологий хранения электроэнергии на каждом узле

w_t – коэффициенты веса каждого временного интервала t в целевой функции

$g_{n,s,t}$ – мощность генератора s на узле n в интервал времени t

$\bar{g}_{n,s}$ – номинальная мощность генератора s на узле n

$h_{n,s,t}$ - мощность технологии хранения s на узле n в интервал времени t

$\bar{h}_{n,s}$ – номинальная мощность технологии хранения s на узле n

$suc_{n,s,t}$ - пусковые затраты, если генератор s на узле n с обязательством установки запускается во время t

$sdc_{n,s,t}$ - стоимость остановки, если генератор s на узле n с обязательством установки запускается во время t

$c_{n,s}$- капитальные затраты на увеличение номинальной мощности генератора s на один МВт

c_l- капитальные затраты на увеличение номинальной мощности линии передач l на один МВА

F_l – дополнительная мощность линии электропередач l в МВА

$o_{n,s,t}$ - предельная стоимость производства электроэнергии генератором за один МВтч.

В самой функции присутствуют переменные оптимальных номинальных и почасовых мощностей генерации, хранения и линий передач, остальные оптимизируемые переменные выявляются из ограничений линейного программирования.

b. Глобальные ограничения оптимизации

В ограничениях оптимизации есть несколько уровней: глобальные ограничения, касающиеся всех линий, генераций или других переменных, и локальные ограничения, которые применены к отдельно взятым переменным.

К глобальным ограничениям относится баланс генерации и нагрузки на каждом узле – закон сохранения энергии для электричества, который должен соблюдаться в любой интервал времени $t \in T$:

$$\sum_s g_{n,s,t} + \sum_s h_{n,s,t} - \sum_s f_{n,s,t} - \sum_l K_{nl} f_{l,t} = \sum_s d_{n,s,t} \quad \leftrightarrow \quad w_t \lambda_{n,t} \quad (2)$$

Где:

$f_{n,s,t}$ – потребление электроэнергии технологией хранения при зарядке

K_{nl} – матрица инцидентности, которая показывает, какие узлы соединены с каждой линией

$f_{l,t}$ – мощность потока по линии l в интервал времени t

$d_{n,s,t}$ – потребление на узле n в интервал времени t

$\lambda_{n,t}$ – теневая предельная стоимость электроэнергии на узле.

Второе важное глобальное ограничение в модели базового сценария – доля возобновляемой энергии в общем потреблении энергии:

$$\frac{\sum_{s \in R,t,n} (g_{n,s,t} + h_{n,s,t})}{\sum_{s,n,t} d_{n,s,t}} \geq RES \quad (3)$$

Где:

$R = \{0, \dots |R| - 1\} \in S$ – подмножество индексов генераторов возобновляемой энергии и технологий хранения на каждом узле.

Третье глобальное ограничение, применимое в основном для сценария углеродной нейтральности –объем выбросов CO2. Данный показатель зависит от угольной и газовой генерации и рассчитывается следующим образом:

$$\sum_{n,s,t} \rho_s \cdot \eta_{n,s}^{-1} \cdot g_{n,s,t} \leq \overline{GHG} \quad (4)$$

Где:

ρ_s – коэффициент выбросов CO_2 для типа генерации s в тоннах CO_2-экв на Мегаватт-час. Для возобновляяемых источников энергии данный коэффициент равен нулю.

$\eta_{n,s}$ – коэффициент полезного действия генератора типа s на узле n

$\overline{GHG}$ – лимит выбросов CO_2 в тоннах CO_2-экв, задаваемый пользователем.

c. Локальные ограничения оптимизации

К локальным ограничениям относятся все ограничения генераторов и технологий хранения по их емкостям, скорости зарядки и разрядки, скорости наращивания и сбавления генерации. Формула (5) показывает ограничение генерации в любой момент времени:

$$\tilde{g}_{n,s,t} * \bar{g}_{n,s} \leq g_{n,s,t} \leq \bar{g}_{n,s,t} * \bar{g}_{n,s} \quad \forall\, t \in T \quad (5)$$

Где:

$\tilde{g}_{n,s,t}, \bar{g}_{n,s,t}$ – доступность генератора s на узле n в интервал t на единицу номинальной мощности. Данные параметры даны на каждый интервал времени, так как для солнечной, ветровой и гидроэнергии доступность генерации зависит от погодных условий.

Помимо этого, есть возможность добавить лимиты на скорость увеличения или уменьшения генерации для контролируемых источников энергии. В данной модели они не были внедрены, и могут быть рассмотрены в последующих работах.

Для технологий хранения электроэнергии также есть локальные ограничения. Максимальное состояние заряда не может быть оптимизировано независимо от максимальной выходной мощности (они связаны переменной максимального количества часов), а максимальная выходная мощность связана с максимальной входной мощностью. Это более реалистичная модель технологии хранения. В PyPSA также есть более гибкая модель накопителей, позволяющая оптимизировать эти переменные отдельно друг от друга. В данной работе учтены только технологии хранения, как аккумуляторные батареи и гидрохранилища. В отличие от генерации, технологии хранения имеют три переменных, зависящих от времени:

Выходная мощность, когда аккумулятор или хранилище разряжается:

$$0 \leq h_{n,s,t} \leq \bar{h}_{n,s} \quad (6)$$

Входная мощность, когда идет зарядка:

$$0 \leq f_{n,s,t} \leq \bar{h}_{n,s} \quad (7)$$

И сам уровень заряда:

$$0 \leq soc_{n,s,t} \leq r_{n,s}\bar{h}_{n,s} \quad (8)$$

Где $r_{n,s}$ – количество часов при номинальной мощности до полной зарядки.

Данные переменные связаны между собой следующим отношением:

$$soc_{n,s,t} = \eta_{\text{stand};n,s}^{w_t} soc_{n,s,t-1} + \eta_{\text{store};n,s} w_t f_{n,s,t} - \eta_{\text{dispatch;n,s}}^{-1} w_t h_{n,s,t} + w_t \text{ inflow}_{n,s,t} - w_t \text{ spillage}_{n,s,t} \quad (9)$$

$\eta_{\text{stand};n,s}^{w_t}$ – постоянные потери из-за различных причин, например, тепловые потери для тепловых хранилищ.

$\eta_{\text{store};n,s}$ и $\eta_{\text{dispatch;n,s}}$ – потери производительности при зарядке и разрядке технологий хранения.

Следующее ограничение касается линий электропередач: каждая линия в любой интервал времени ограничена своей пропускной способностью, что выражается следующей формулой:

$$\left|f_{l,t}\right| \leq F_l \quad (10)$$

где и правая, и левая стороны уравнения являются переменными оптимизации при возможности увеличения пропускной способности линий передач.

Все ограничения и целевое уравнение обрабатываются модулем Linopy для репрезентации в виде линейного программирования и далее Snakemake запускает программное обеспечение для решения оптимизационной задачи вне среды Python на любом из доступных программных обеспечений.

1.3.2. Результаты моделирования

В данной главе представлены результаты моделирования для 2030-2060 годов с интервалом в 10 лет для базового сценария и сценария углеродной нейтральности. Сравнение, где необходимо, идет с базовым 2018 годом. В главе дано описание изменения выбросов CO_2 в электроэнергетике, изменение мощностей технологий и пропускных мощностей линий электропередач, затраты на осуществление каждого сценария.

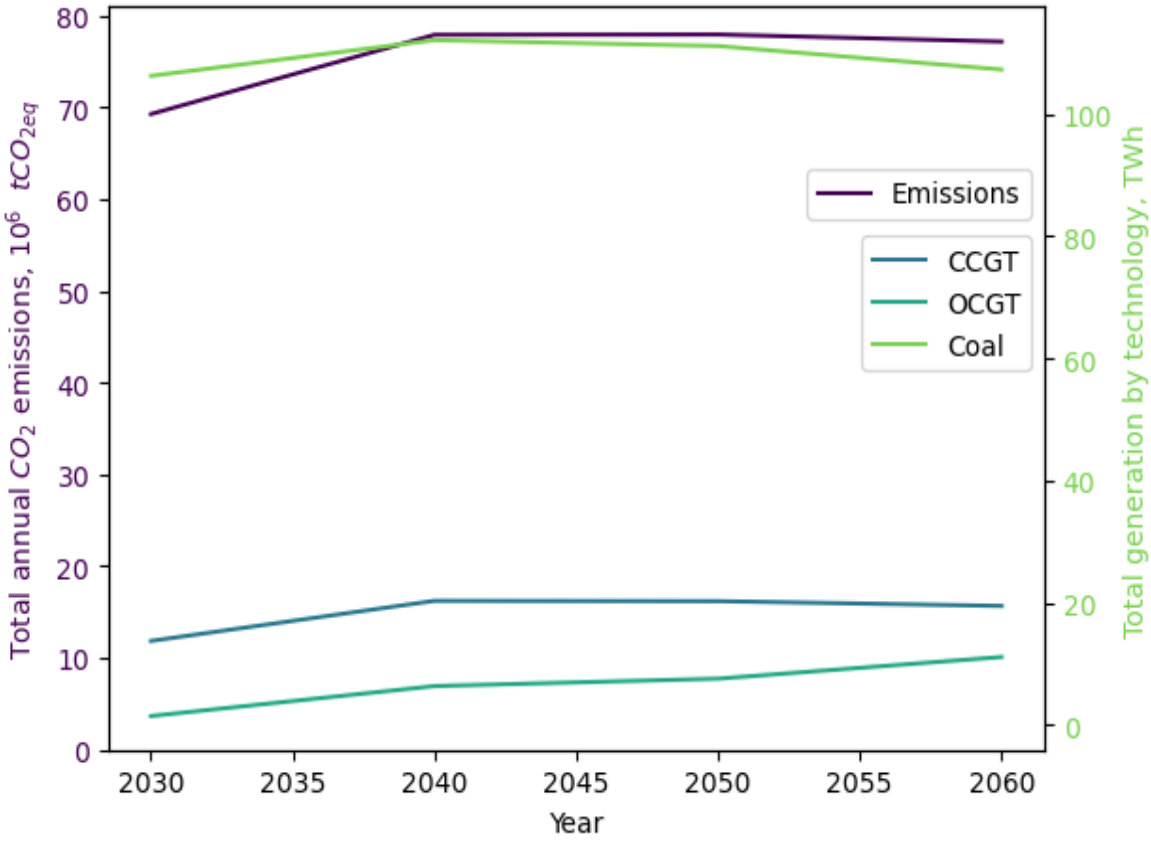


Рисунок 1.3.1. Годовой объем выбросов CO_2 сектора электроэнергии в базовом сценарии.

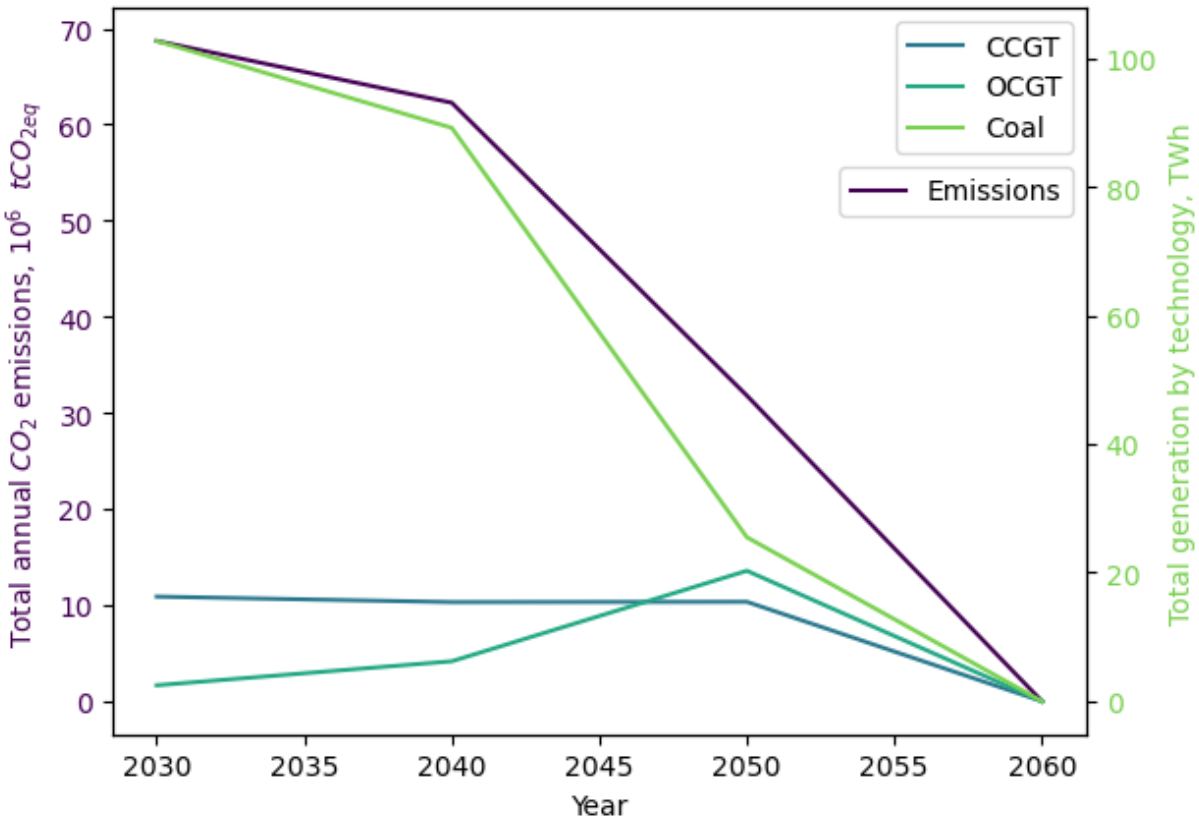


Рисунок 1.3.2. Годовой объем выбросов CO2 сектора электроэнергии в сценарии углеродной нейтральности.

Рисунок 1.3.1 и Рисунок 1.3.2 показывают тренды снижения выбросов CO2 (левая шкала) и изменение потребляемого электричества (правая шкала), произведенного на ископаемом топливе. В базовом сценарии даже при росте потребления в 2 раза к 2060 году количество выбросов остается в пределах 80 млн тонн CO2-экв., что соответствует снижению на 15% от уровня 1990 года за счет развития и снижения капитальных затрат на возобновляемые источники энергии. В сценарии углеродной нейтральности идет поэтапное снижение выбросов согласно целям по снижению. В связи с этим, падает общее производство электроэнергии невозобновляемыми источниками энергии за счет резкого снижения потребления угля. Примечательно, что генерация газовых турбин растет до 2050 года и падает к 2060 году. Возможно, это связано с оптимизацией каждого периода независимо от следующего, и при многопериодной оптимизации данный тренд может измениться.

Далее представлены оптимальные изменения мощностей различных технологий в суммарном количестве и по областям. Из-за неопределённости в генерации энергии от солнечных и ветровых электростанций идет значительный рост установленных мощностей в обоих сценариях, особенно в 2050 и 2060 году (см. Рисунок 1.3.3, Рисунок 1.3.4). В сценарии углеродной нейтральности из-за сокращения генерации на невозобновляемых источниках рост возобновляемых источников энергии идет еще более интенсивно. В 2060 году общая установленная мощность по стране составит 270 ГВт, что в четыре раза превышает значение для базового сценария (67 ГВт). Из данных мощностей для

базового сценария и сценария углеродной нейтральности мощности возобновляяемых источников энергии составляют 45 ГВт и 265ГВт соответственно. При симуляции различных погодных и экономических сценариев в присутствии неопределенности эти значения могут далее увеличиваться для обеспечения резервных мощностей.

Таблица 1.3.1 и Таблица 1.3.2 показывают прирост мощностей по областям Республики Казахстан. Жирным шрифтом выделены те мощности, которые не изменяются в другом сценарии. В базовом сценарии основное отличие – значительный прирост газовых турбин. В сценарии углеродной нейтральности там, где в базовом были добавлены газовые турбины, их заменяют либо солнечные, либо ветровые установки. По областям самый значительный прирост наблюдается в Карагандинской (92 ГВт), Восточно-Казахстанской (45 ГВт) и Алматинской (38 ГВт) областях.

Системы хранения в обоих сценариях оптимально устанавливать по всем областям. В базовом сценарии мощность установленных батарей к 2060 году достигает 3.6 ГВт, в то время как для сценария углеродной нейтральности это значение составило 5.3 ГВт. Дополнительно в сценарии углеродной нейтральности устанавливается 40.6 ГВт водородных хранилищ, и итоговая доля технологий хранения в общей генерации составляет 17%. Итого, относительно базового сценария для декарбонизации электроэнергетики потребуются в 13 раз больше мощностей систем хранения.

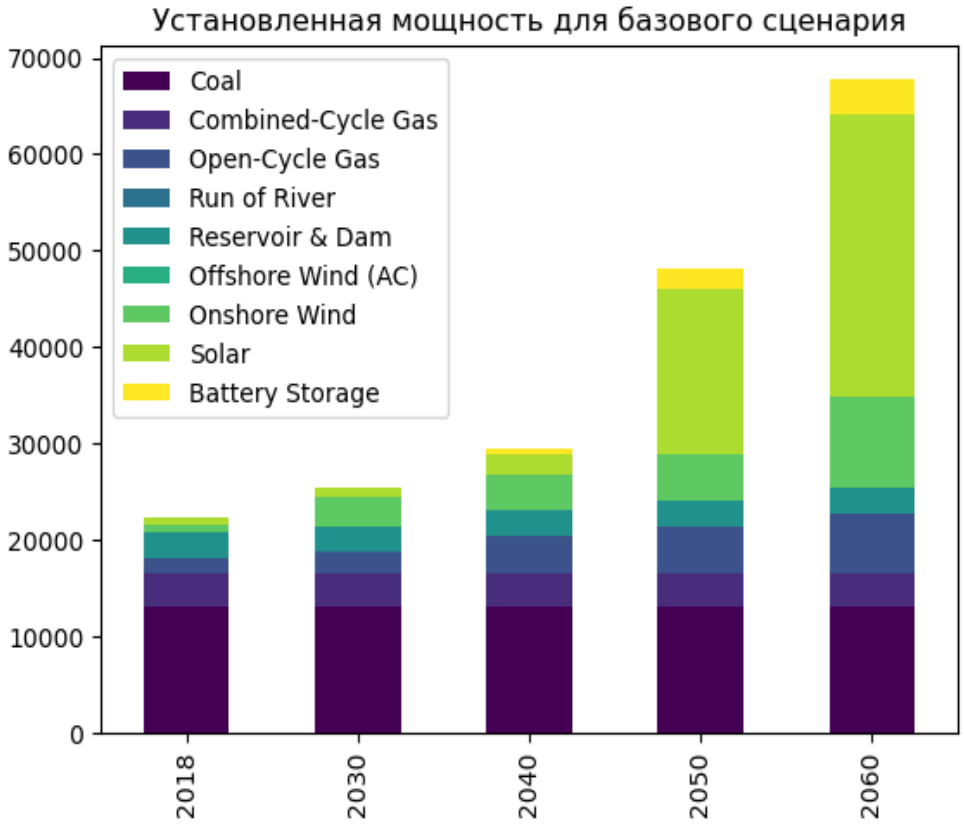


Рисунок 1.3.3. Оптимальные мощности технологий в базовом сценарии

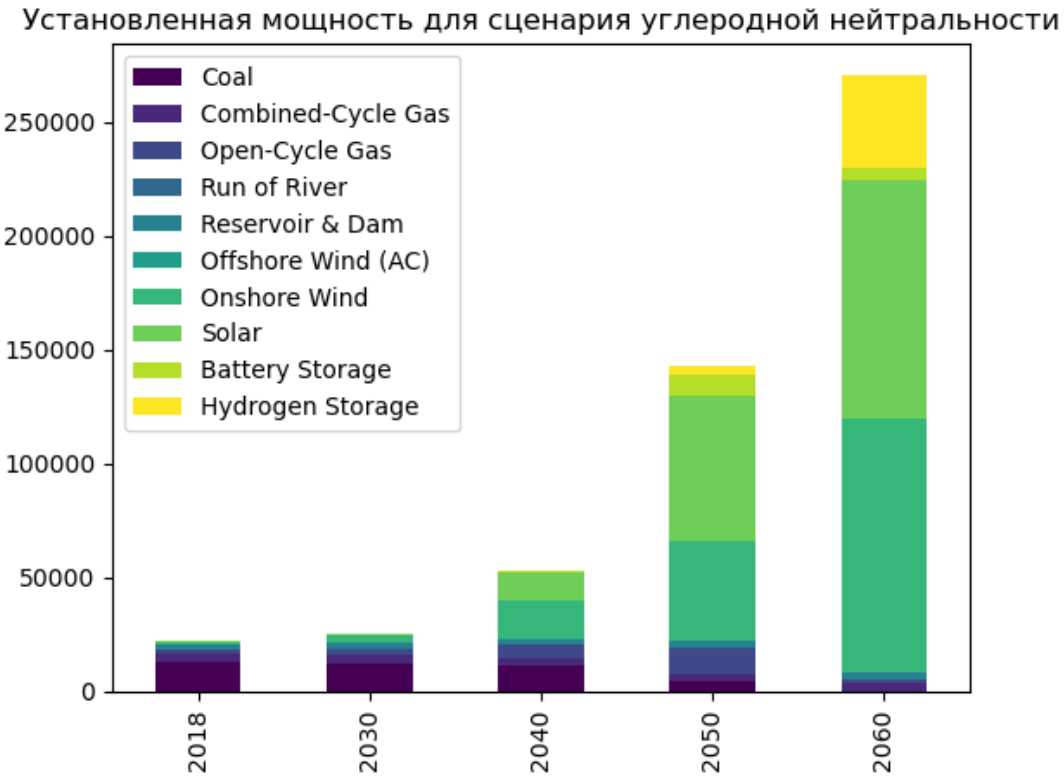


Рисунок 1.3.4. Оптимальные мощности технологий в сценарии углеродной нейтральности

Таблица 1.3.1 Увеличение мощностей по областям в базовом сценарии

Область	Технологии	Мощность, МВт					Рост, %
		2018	2030	2040	2050	2060	
Акмолинская область	Батареи	0	0.37	54.06	67.53	1.3	100%
Актюбинская область	Батареи	0	0.37	53.87	19.37	0.18	100%
	Газовые турбины	296	464	1603	2734	2021	**583%**
Алматинская область	Батареи	0	0.36	47.94	149	1364	100%
	Солнечные панели	152	152	152	7201	12531	8144%
Атырауская область	Батареи	0	0.02	0.02	0.08	12.23	100%
	Ветряные станции	101	528	550	621	867	759%
	Солнечные панели	0	0.01	0.05	894	1367	100%
Восточно-Казахстанская область	Батареи	0	0.37	51.41	78.41	1.13	100%
	Солнечные панели	30	30	30	30	2816	9285%
Жамбылская область	Батареи	0	0.36	48.73	523	11.56	100%
	Ветряные станции	0	0.02	0.03	0.04	0.12	100%
Западно-Казахстанская область	Батареи	0	0.02	0.04	19.28	66.24	100%
	Ветряные станции	0	321	204	298	453	100%
	Газовые турбины	**59**	**59**	**59**	**118**	**93.73**	**59%**
	Газовые турбины	**198**	**198**	**198**	**250**	**341**	**72%**
	Солнечные панели	0	0.01	0.11	592	894	100%
Карагандинская область	Батареи	0	0.37	55.35	65.49	3.4	100%
	Ветряные станции	48	48	413	1437	3468	7126%
	Газовые турбины	**189**	**547**	**1216**	**872**	**2782**	**1372%**
Костанайская область	Батареи	0	0.37	55.36	74.81	1.3	100%
	Солнечные панели	0	0.01	0.02	0.03	0.09	100%
Кызылординская область	Батареи	0	0.44	1.02	43.39	114	100%
	Ветряные станции	0	221	375	464	542	100%
	Газовые турбины	**19**	**110**	**19**	**19**	**145**	**665%**
	Солнечные панели	78	78	136	440	787	910%
Мангыстауская область	Батареи	0	0.02	0.02	0.09	253	100%
	Ветряные станции	43.2	1534	1544	1053	1463	3287%
	Солнечные панели	0	0.01	0.05	2109	3014	100%
Павлодарская область	Батареи	0	0.37	56.95	65.71	1.28	100%
	Ветряные станции	0	0.02	0.12	421	2133	100%
	Солнечные панели	0	0	0.02	0.03	0.05	100%
Северо-Казахстанская область	Батареи	0	0.37	53.7	75.97	1.3	100%
	Солнечные панели	0	0	0.01	0.02	0.04	100%
Туркестанская область	Батареи	0	0.35	45.43	866	1804	100%
	Солнечные панели	169	169	1522	5636	7589	4379%
Общий прирост			3081	7162	25853	45562	

Таблица 1.3.2. Увеличение мощностей по областям в сценарии углеродной нейтральности

Область	Технологии	Мощность, МВт					Рост, %
		2018	2030	2040	2050	2060	
Акмолинская область	Батареи	0	0.95	3.01	6.37	1.46	100%
	Водород	0	0.03	0.05	0.49	192	100%
Актюбинская область	Батареи	0	0.95	3.6	4.37	69.99	100%
	Водород	0	0.03	0.05	0.12	80.54	100%
Алматинская область	Батареи	0	0.95	2.66	4352	2974	100%
	Водород	0	0.03	0.05	654	4046	100%
	Солнечные панели	152	152	4887	20673	30908	20234%
	Батареи	0	0.02	0.09	170	0.41	100%
	Ветряные станции	101	436	1055	1459	2614	2488%
	Водород	0	0.01	0.04	1.49	704	100%
	Солнечные панели	0	0.01	489	1629	0.14	100%
Восточно-Казахстанская область	Батареи	0	0.95	1.15	2290	476	100%
	Ветряные станции	**180**	**180**	**180**	**389**	**15497**	**8510%**
	Водород	0	0.03	0.05	96.19	7819	100%
	Солнечные панели	30	30	30	10376	21511	71605%
Жамбылская область	Батареи	0	0.95	3.33	176	74.04	100%
	Ветряные станции	0	0.03	160	4007	10494	100%
	Водород	0	0.03	0.05	443	2208	100%
Западно-Казахстанская область	Батареи	0	0.03	13.66	157	0.41	100%
	Ветряные станции	0	279	568	933	2113	100%
	Водород	0	0.02	0.13	46.02	463	100%
	Солнечные панели	0	0.01	304	1098	0.16	100%
Карагандинская область	Батареи	0	0.95	747	0.69	0.42	100%
	Ветряные станции	48	105	8823	19451	45145	93952%
	Водород	0	0.03	0.05	1839	15384	100%
	Солнечные панели	**190**	**190**	**190**	**6796**	**31855**	**16666%**
Костанайская область	Батареи	0	0.95	3.02	132	414	100%
	Ветряные станции	**50**	**50**	**50**	**3671**	**202**	**303%**
	Водород	0	0.03	0.05	0.52	250	100%
	Солнечные панели	0	0.01	0.03	8183	4174	100%
Кызылординская область	Батареи	0	0.43	51.45	77.81	0.8	100%
	Ветряные станции	0	325	576	916	2789	100%
	Водород	0	0.03	0.07	175	1259	100%
	Солнечные панели	78	78	282	1029	2296	2844%
Мангыстауская область	Батареи	0	0.02	0.1	382	0.42	100%
	Ветряные станции	43.2	1502	1962	3202	11560	26659%
	Водород	0	0.02	0.05	412	6017	100%
	Солнечные панели	0	0.01	888	4392	4629	100%
Павлодарская область	Батареи	0	0.95	0.87	4.83	0.49	100%
	Ветряные станции	0	0.04	2922	10097	19022	100%
	Водород	0	0.03	0.05	0.7	2024	100%

	Солнечные панели	0	0.01	0.02	0.43	0.39	100%
Северо-Казахстанская область	Батареи	0	0.95	3.01	6.35	1.46	100%
	Ветряные станции	**10.5**	**10.5**	**10.51**	**10.58**	**1926**	**18242%**
	Водород	0	0.03	0.05	0.49	189	100%
	Солнечные панели	0	0.01	0.02	0.11	0.17	100%
Туркестанская область	**Гидроэлектрост.**	**0**	**0**	**0**	**126**	**126**	**100%**
	Батареи	0	0.95	455	2072	1353	100%
	Водород	0	0.03	0.05	187	3.01	100%
	Солнечные панели	169	169	5127	8897	9600	5566%
Общий прирост			15 991	43 843	133 862	261 415	

Также в таблице ниже представлено сокращение угольной электроэнергии по областям. В Карагандинской области отказ от угля происходит быстрее, чем в других областях, и снижение отмечается уже в 2030 году. Остальные области начинают снижение угольных мощностей только к 2050 году, когда требования по выбросам ужесточаются. Все области в данном сценарии успешно пришли к нулевым показателям по углю к 2060 году.

Таблица 1.3.3. Снижение угольных мощностей в сценарии углеродной нейтральности

Область	2018	2030	2040	2050	2060
Акмолинская область	562	562	562	504	0
Алматинская область	828	828	828	0.07	0
Восточно-Казахстанская область	424	424	424	1.2	0
Карагандинская область	2462	1726	592	0.06	0
Костанайская область	267	267	267	267	0
Павлодарская область	7977	7976	7977	3051	0
Северо-Казахстанская область	434	434	434	434	0
Туркестанская область	13	13	13	0.07	0

Рисунок 1.3.5 показывает данные таблицы выше в виде графика. Четыре области – Алматинская, Карагандинская, Туркестанская и Восточно-Казахстанская область – практически полностью отказываются от угольной генерации к 2050 году, и четыре оставшиеся - к 2060 году. Примечательно, что самым последним от угольной генерации отказывается северный регион, который сильно зависим от угля в отопительный период и не располагает значительным солнечным потенциалом. Очередность, в которой области отказываются от угля, далее влияет на распределение мощностей возобновляемых источников энергии в этих областях.

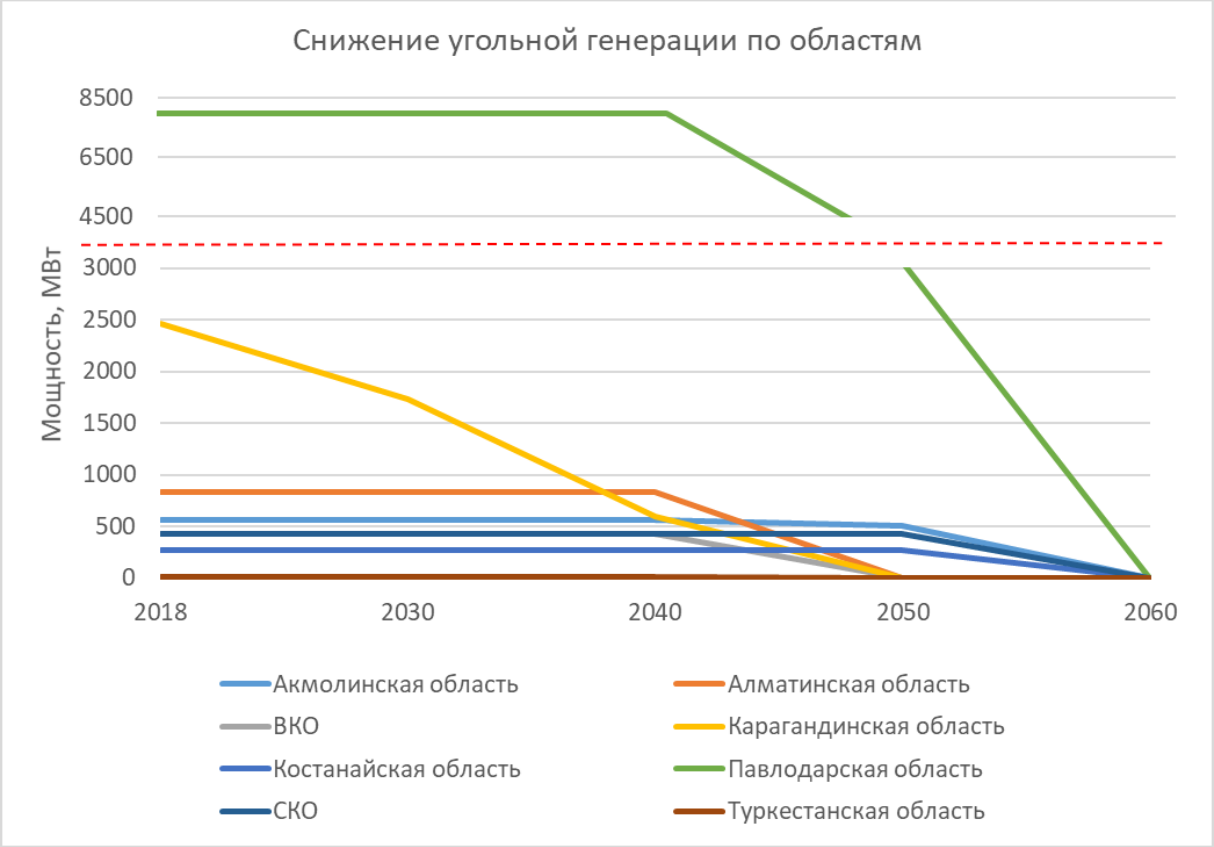


Рисунок 1.3.5. Снижение угольной генерации по областям в сценарии углеродной нейтральности

Рисунок 1.3.6 и Рисунок 1.3.7 показывают распределение генерации электроэнергии между технологиями. Батареи и водородные хранилища имеют отрицательную итоговую генерацию из-за того, что к концу года они остаются частично заряженными, то есть выступают как потребители электроэнергии. В базовом сценарии распределение генерации не сильно изменяется, так как невозобновляемые источники энергии не снижают мощностей. В сценарии углеродной нейтральности, во-первых, потребление электроэнергии растет быстрее, во-вторых, снижается генерация невозобновляемых источников энергии. Если в базовом сценарии генерация солнечной электроэнергии была выше, чем ветряной, то в сценарии углеродной нейтральности значительную долю потребления покрывает ветряная генерация, так как она доступна в течение всего дня, а не только в дневные часы.

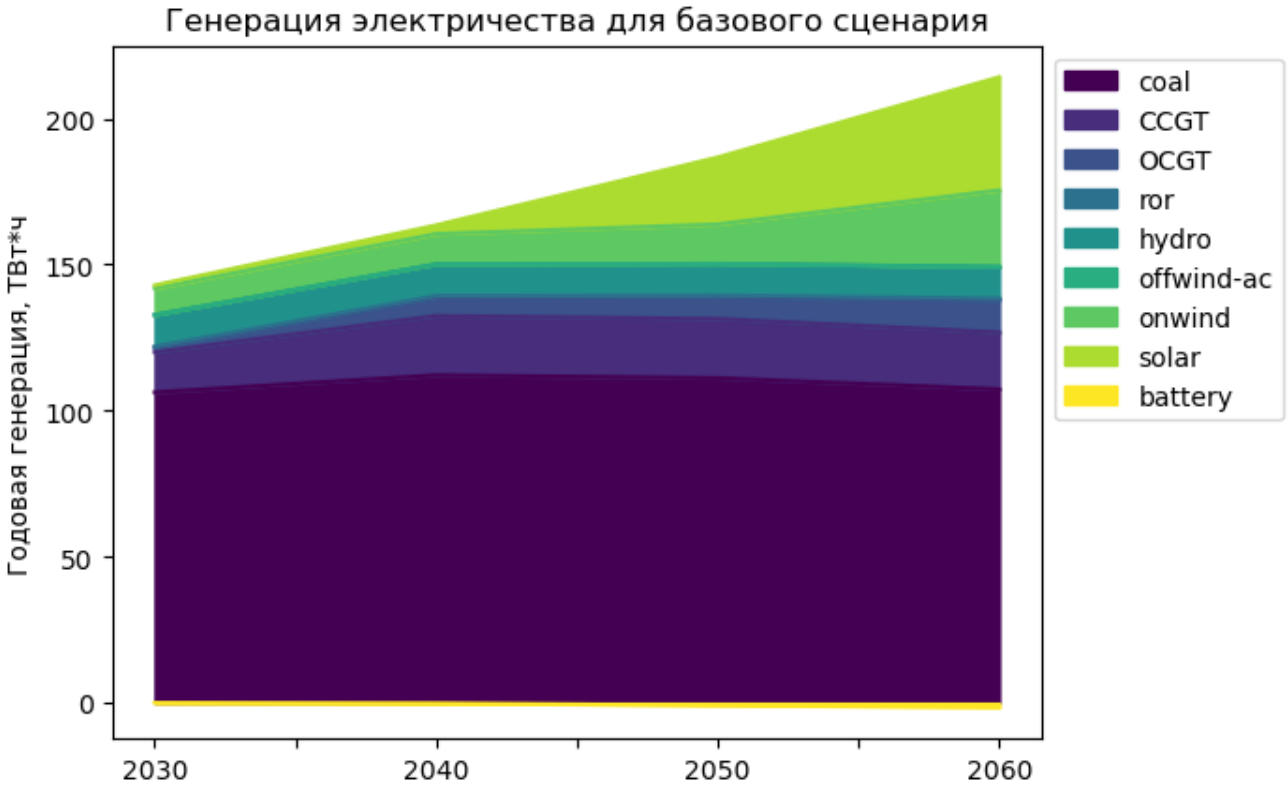


Рисунок 1.3.6. Производство электроэнергии в базовом сценарии

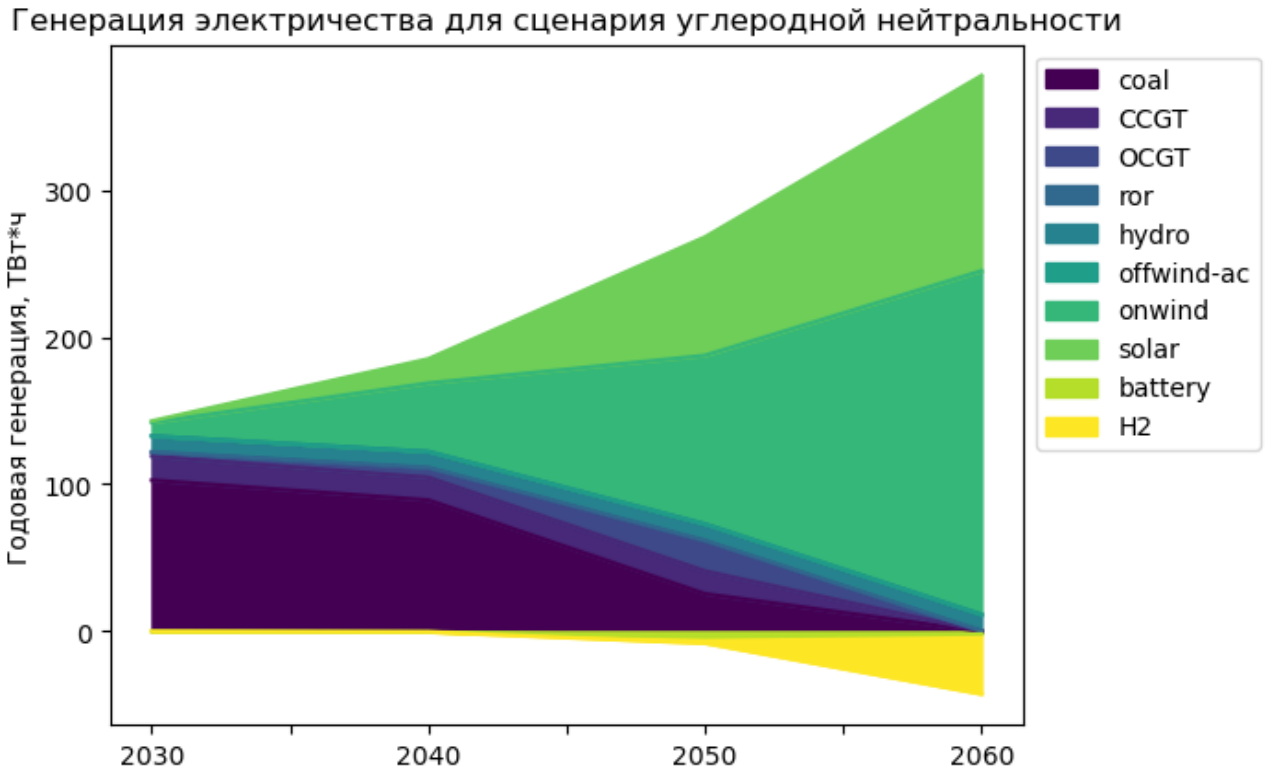


Рисунок 1.3.7. Производство электроэнергии в сценарии углеродной нейтральности.

В модели есть два типа газовых турбин – CCGT и OCGT. По сценарию только для OCGT могут быть установлены дополнительные мощности и при декарбонизации не предусмотрено снижения мощностей до нуля, но только до

значения 2018-ого базового года. При этом использование мощностей газовых турбин сокращается до нуля в 2060 году за счет ограничения по выбросам в сценарии углеродной нейтральности (см. Рисунок 1.3.7). На рисунках ниже представлены изменения по мощностям газовых турбин в тех областях, где происходят изменения.

В двух областях – Мангыстауской и Атырауской – в обоих сценариях мощности OCGT не меняются, и в Западном регионе все новые невозобновляемые мощности устанавливаются в ЗКО. В сценарии углеродной нейтральности в 2050 году достигается пик из-за значительного роста энергопотребления и не строгих целей по снижению выбросов. В 2060 году мощности обратно подают до значения 2018 года, и генерация падает до нуля. В Базовом сценарии рост начинается только к 2050 году и в 2060 достигает 340 МВт из-за роста потребления.

Мощности газовых турбин во всех областях для сценария углеродной нейтральности следуют одинаковому тренду – достигают пика к 2050 году и затем снижаются. В базовом сценарии в каждой области присутствует свой тренд и, возможно, происходит перераспределение мощностей между областями, при этом общая мощность OCGT по республике стабильно растет. Перераспределение можно объяснить тем, что на данный момент при симуляции предыдущего года модель не видит сценарий следующего года и не может выбрать суб-оптимальный вариант из расчета, что целевая функция будет более оптимальная в следующем отрезке симуляции.

Далее представлены изменения генерации возобновляяемых источников энергии для сценария углеродной нейтральности. В сценарии было допустимо увеличение мощностей морских ветряных установок в Мангыстауской и Атырауской областях, но из-за дороговизны технологий и незначительного потенциала, программа посчитала целесообразным установить только 10 кВт мощностей в Атырауской области в 2050 и 2060 годах. Из-за незначительности установки морские ветряные установки были опущены в дальнейшем обсуждении.

Рисунок 1.3.8. Мощности OCGT в Западно-Казахстанской области в обоих сценариях

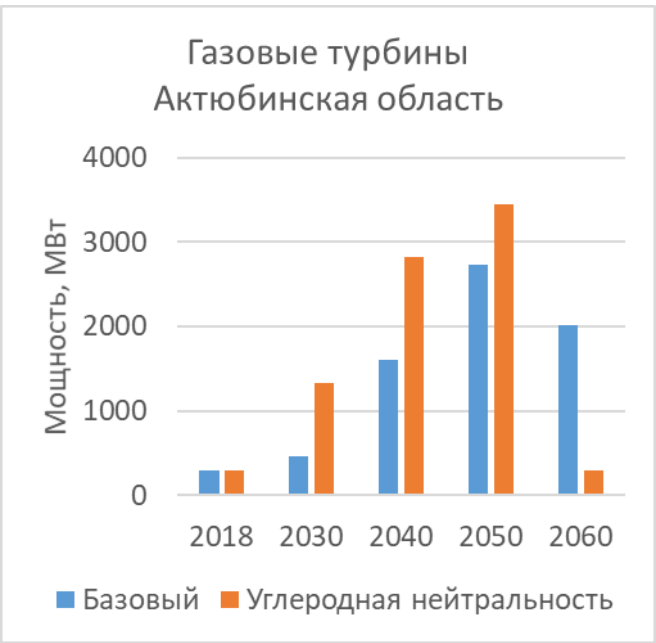


Рисунок 1.3.9. Мощности OCGT в Актюбинской области в обоих сценариях

Рисунок 1.3.10. Мощности OCGT в Карагандинской области в обоих сценариях

Рисунок 1.3.11. Мощности OCGT в Кызылординской области в обоих сценариях

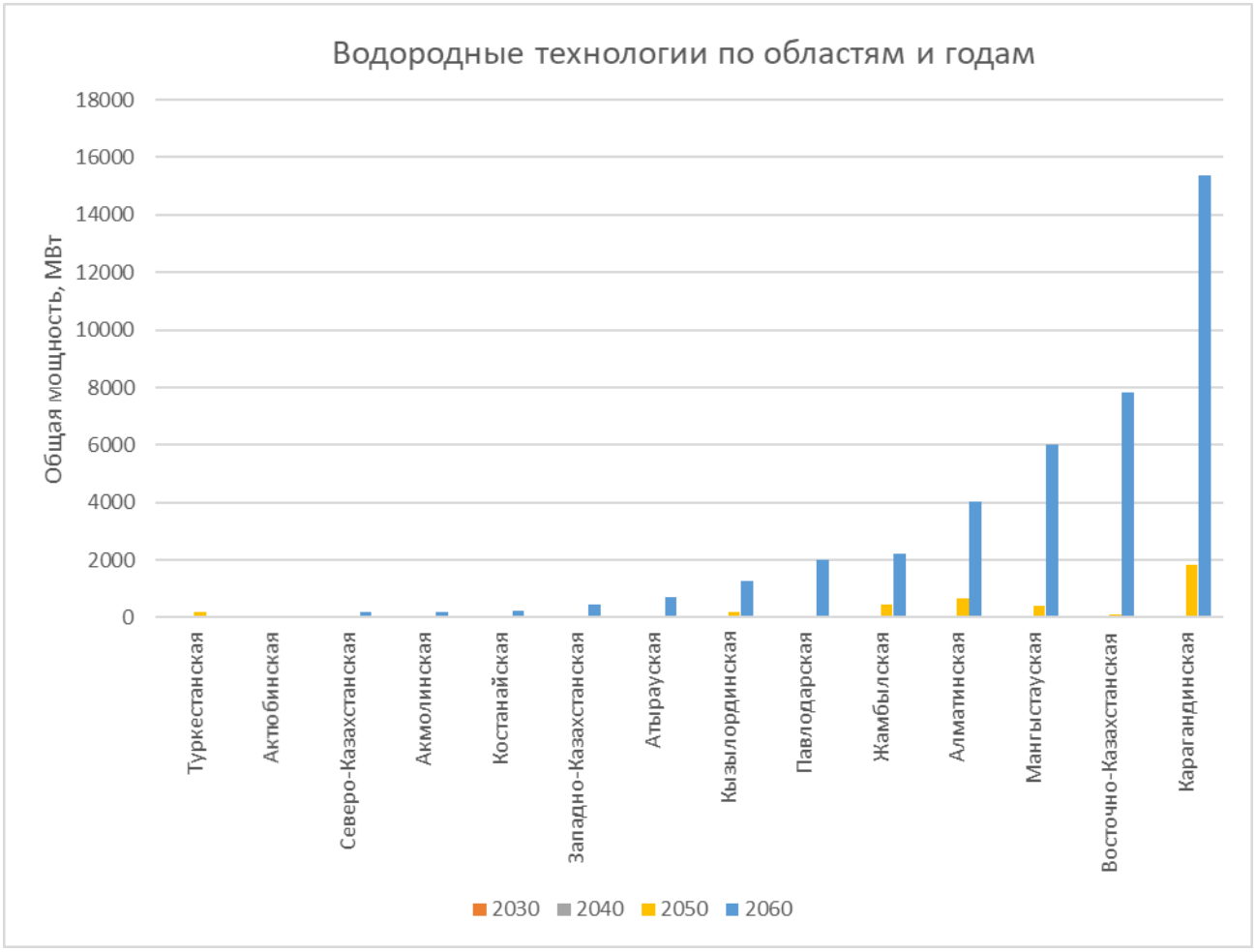


Рисунок 1.3.12. Распределение мощностей водородных систем хранения по областям в сценарии углеродной нейтральности

Водородные системы хранения в сценарии углеродной нейтральности размещаются во всех областях, но с разными мощностями. Рисунок 1.3.12 показывает данное распределение и рост мощностей в каждой декаде. Области отсортированы от наименьшей мощности к наибольшей в 2060 году. Опять Карагандинская область потребует самых больших вложений, в связи с тем, что там ожидается самый большой рост возобновляемых источников энергии и она соединена с наибольшим количеством областей, что позволяет предоставлять услуги балансировки другим регионам. В западном регионе центром по технологиям хранения является Мангыстауская область также из-за самого большого прироста мощностей возобновляемых источников энергии, которые будут нуждаться в балансировке. Резкий скачок по водородным технологиям наблюдается между 2050-2060 годами, так как в 2060 есть требование снизит выбросы до нуля, а это означает абсолютную зависимость от прерывистой генерации возобновляемых источников энергии, которую необходимо компенсировать. Также скачок может быть связан с прогнозируемым падением цены на водородные технологии.

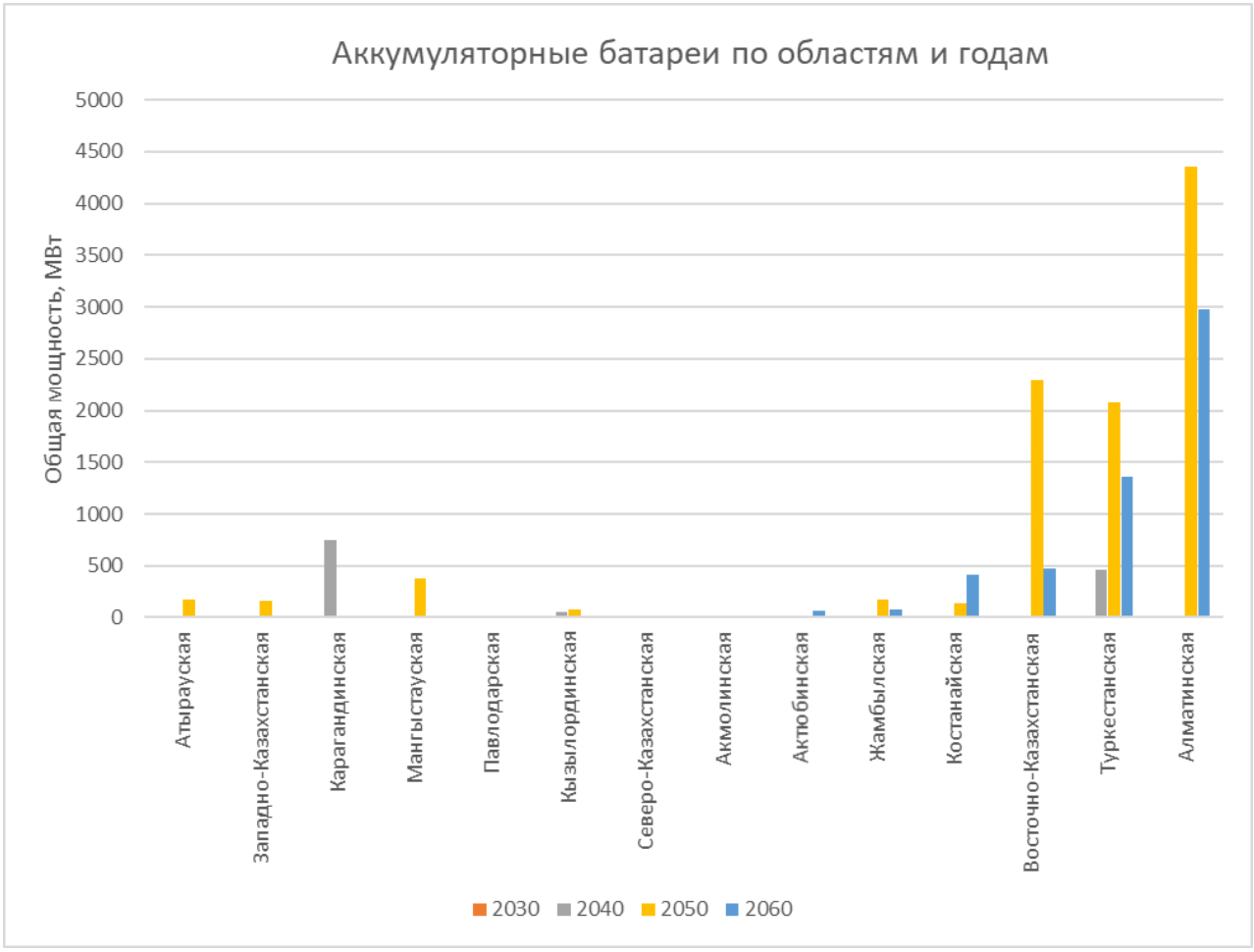


Рисунок 1.3.13. Распределение мощностей аккумуляторных батарей по областям в сценарии углеродной нейтральности

Аккумуляторные батареи в сценарии углеродной нейтральности являются первым вариантом по технологиям хранения до того момента, пока водородные хранилища не станут более доступными. Из примечательного – в Карагандинской области в 2040 году уже будут установлены значительные мощности аккумуляторных батарей, так как в Карагандинской области будет самый ранний рост возобновляемых источников энергии в связи с отказом от угля. В 2050 году мощности установленных аккумуляторных батарей достигают пика в 9.8 ГВт и затем падают до 5.4 ГВт в 2060 году. Падение доли аккумуляторных батарей связано с переходом на водородные технологии. Однако, для осуществления данного перехода водородные технологии должны достигнуть определенного уровня зрелости и снизить стоимость, что сейчас сильно зависит от развития научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и промышленности. Также возможен вариант развития какой-то новой технологии хранения или возобновляемых источников энергии, которая может полностью изменить распределение мощностей, но в данных сценариях рассматривается только планомерное развитие существующих технологий.

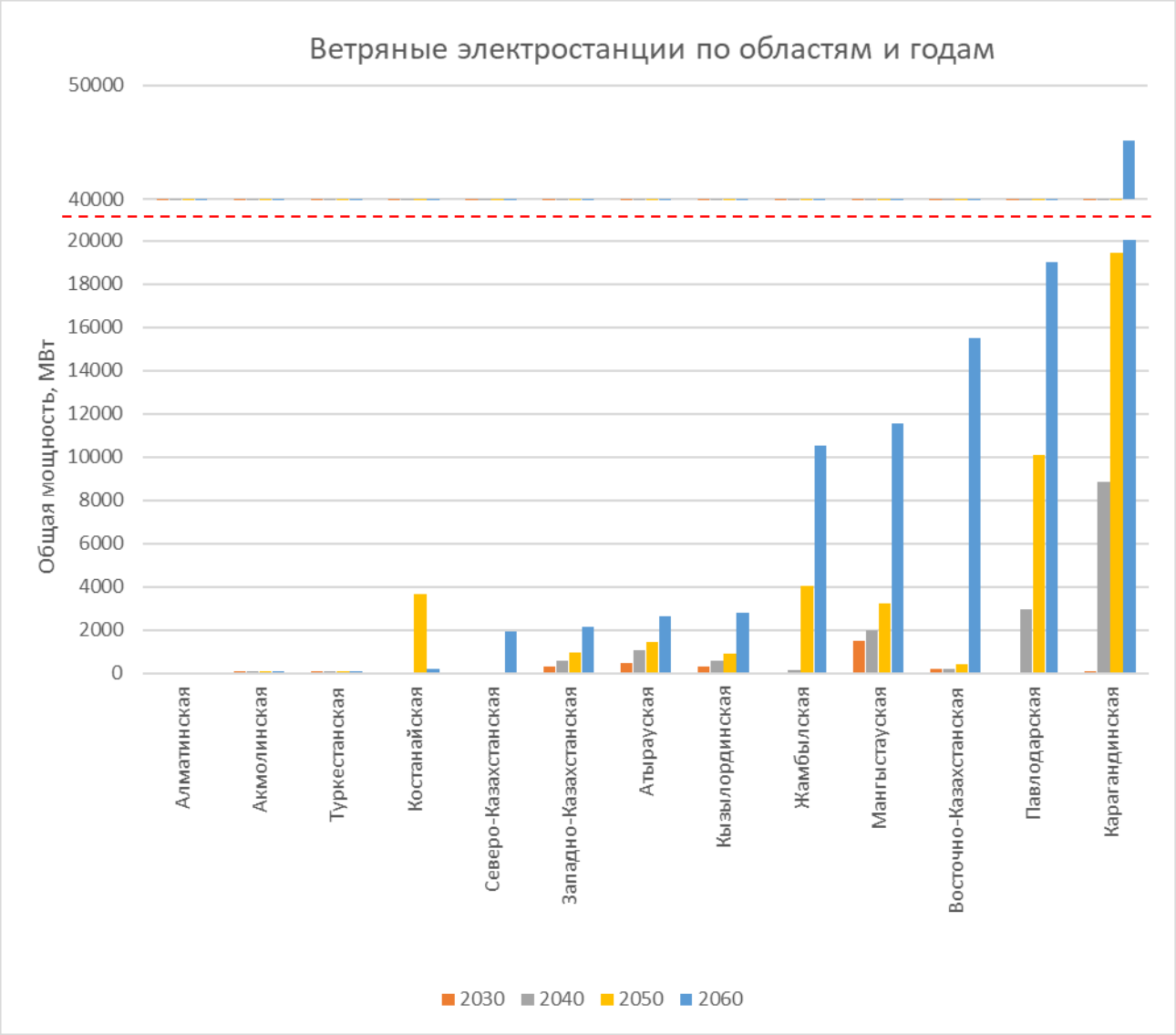


Рисунок 1.3.14. Распределение мощностей ветряных электростанций по областям по возрастанию в сценарии углеродной нейтральности

Республика Казахстан обладает большим ветровым потенциалом по всей территории, что видно по распределению мощностей на рисунке выше. Постепенное снижение цен и потребность перехода на возобновляемые источники энергии для снижения выбросов приводит к росту мощностей ветряных электростанций. Карагандинская область (на 2018 год) имеет самые значительные установки ветрогенерации. Начиная с 2040 года для перехода от угольной генерации, необходимо установить в этой области дополнительно более 8 ГВт ветряных электростанций, а к 2060 году это значение должно вырасти до 45 ГВт, что в 2 раза больше, чем в Павлодарской области, которая находится на втором месте по ветрогенерации. Западный регион отличается от других плавным прибавлением мощностей данной технологии, и общая ветровая генерация в 2060 году в этих трех областях составит 16 ГВт, что в 3 раза меньше, чем в Карагандинской области. В Костанайской области прирост мощностей показан в 2050 году, но падает в 2060 году. Возможно, данный тренд исчезнет при многопериодной оптимизации из-за более оптимального распределения

инвестиций в разрезе нескольких декад. Установка значительной ветровой и солнечной генерации должна быть оценена с точки зрения доступности земель для строительства, чтобы расширение электроэнергетического потенциала не привело к ухудшению в сфере сельского хозяйства.

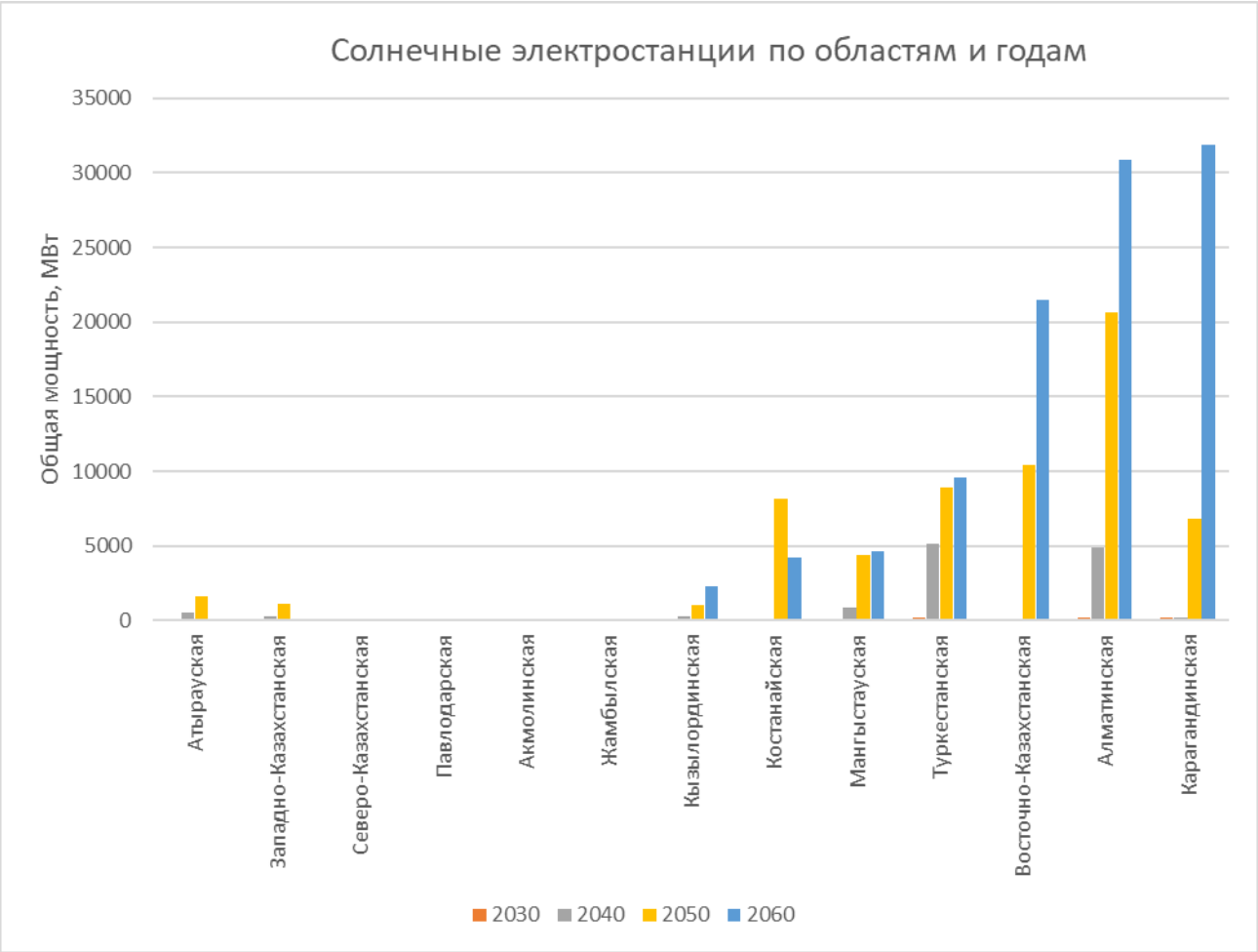


Рисунок 1.3.15. Распределение мощностей солнечных электростанций по областям в сценарии углеродной нейтральности

По солнечным электростанциям в 2060 году опять лидирует Карагандинская область, но уже с незначительным отрывом от второй – Алматинской области. Общая мощность солнечных электростанций в 2060 году составила 105 ГВт, и 80% приходится на три области – Восточно-Казахстанскую, Алматинскую и Карагандинскую. Примечательно, что из всех южных областей программа не предлагает увеличение солнечных электростанций в Жамбылской области из-за значительного роста ветряных электростанций в регионе (см. Рисунок 1.3.14), а также из-за наличия охраняемых территорий, заповедников и гор. При решении о строительстве солнечных или ветряных электростанций в Жамбылской области данный тренд может быть пересмотрен, так как спутниковые данные, используемые для определения пригодности земель и потенциала возобновляяемых источников энергии в текущем отчете, не дают достаточного разрешения для детальных решений.

Рисунок 1.3.16 показывает распределение мощностей по областям в 2060 году для обоих сценариев. Диаграммы позволяют сравнить, как происходит перераспределение мощностей между областями в зависимости от сценария. Области на данной диаграмме для базового года отсортированы от наименьшей генерации к наибольшей. Если в базовом сценарии лидировала Алматинская область по установленным мощностям генерации, то в сценарии углеродной нейтральности 35% всех мощностей установлены в Карагандинской области. Также растет значение Восточно-Казахстанской и Жамбылской областей в общей генерации. Восточно-Казахстанская область примечательна тем, что там в 2060 году установлены значительные мощности и солнечной, и ветряной генерации, и разница между базовым и сценарием углеродной нейтральности составляет 10 раз, при разнице общей мощности генерации по стране в примерно 4 раз (61 ГВт и 222 ГВт). Акмолинская и Актюбинская области при этом практически не увеличивают свою генерацию, несмотря на рост электропотребления в сравнении с базовым сценарием.

Рисунок 1.3.17 показывает такое же распределение для систем хранения электроэнергии в 2060 году. Системы хранения включают гидроакуумулирующие электростанции, аккумуляторные батареи и водородные системы хранения. По технологиям хранения также Карагандинская область занимает лидирующее место в сценарии углеродной нейтральности, опережая Алматинскую. Хоть по мощностям в обоих сценариях в Туркестанской области значения не сильно различаются, разница в пропорции значительна – если в базовом сценарии 29% технологий хранения страны были сосредоточены в этой области, то в сценарии углеродной нейтральности Туркестанская область располагает только 3%. По сравнению с базовым сценарием, в сценарии углеродной нейтральности наблюдается более равномерное размещение мощностей систем хранения электроэнергии, обусловленное распределением возобновляяемых источников энергии.

Исходя из результатов оптимизации, следует усилить инвестиции в Карагандинскую область на развитие в ней возобновляяемых источников энергии уже к 2030 году. Один из вариантов привлечения инвестиций – сделать Карагандинскую и Улытаускую области центром инноваций по возобновляемым источникам энергии и систем хранения для тестирования пилотных проектов. Учитывая мощную промышленную базу в данном регионе, есть возможность развить здесь заводы по производству необходимых деталей и техники для возобновляяемых источников энергии и систем хранения, чтобы сократить логистические расходы при транспортировке по стране. Данная стратегия также поможет перераспределить человеческие ресурсы при отказе от угля и избежать роста безработицы.

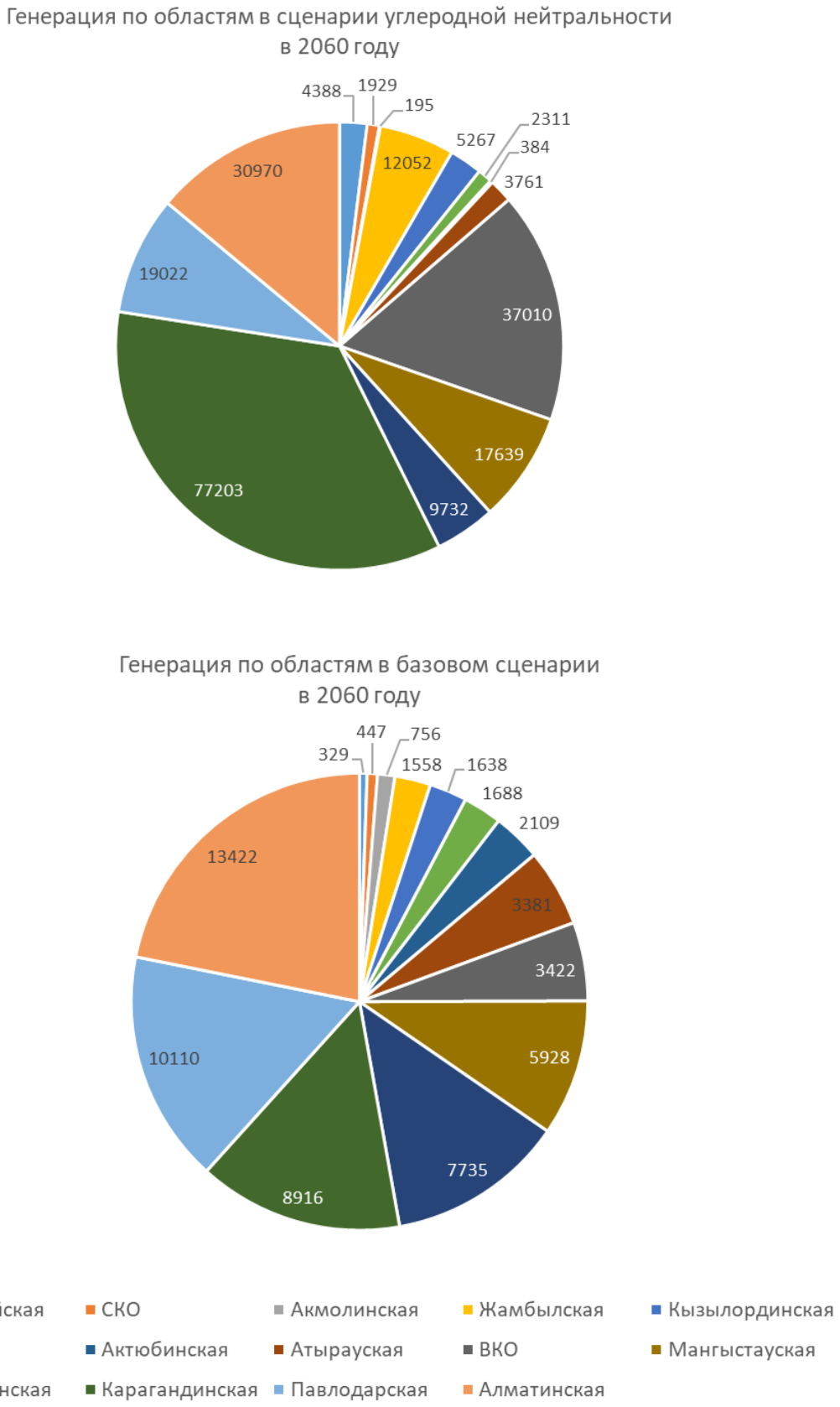


Рисунок 1.3.16.Установленные мощности генерации по областям в 2060 году (базовый сценарий отсортирован от меньшего к большему).

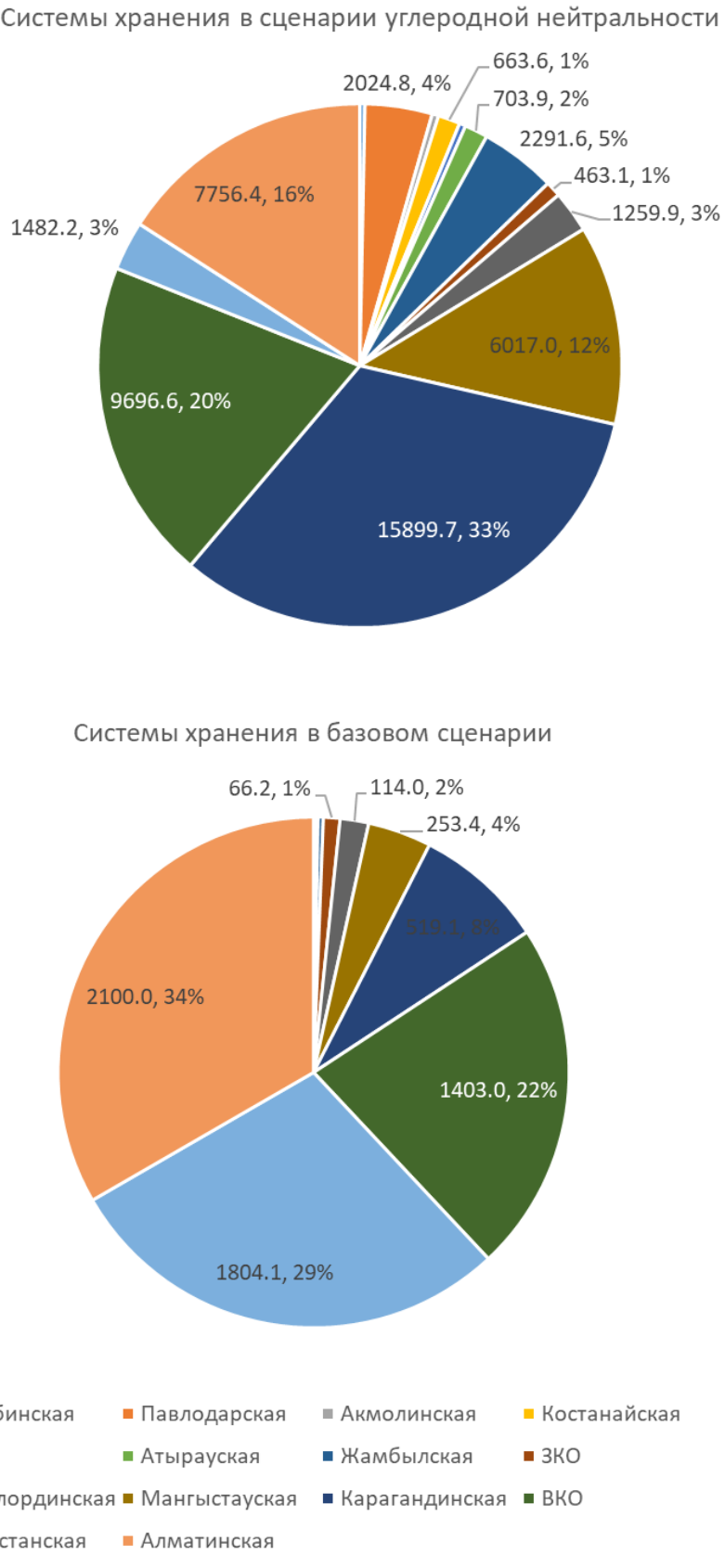


Рисунок 1.3.17 Установленные мощности технологий хранения по областям в 2060 году (базовый сценарий отсортирован от меньшего к большему).

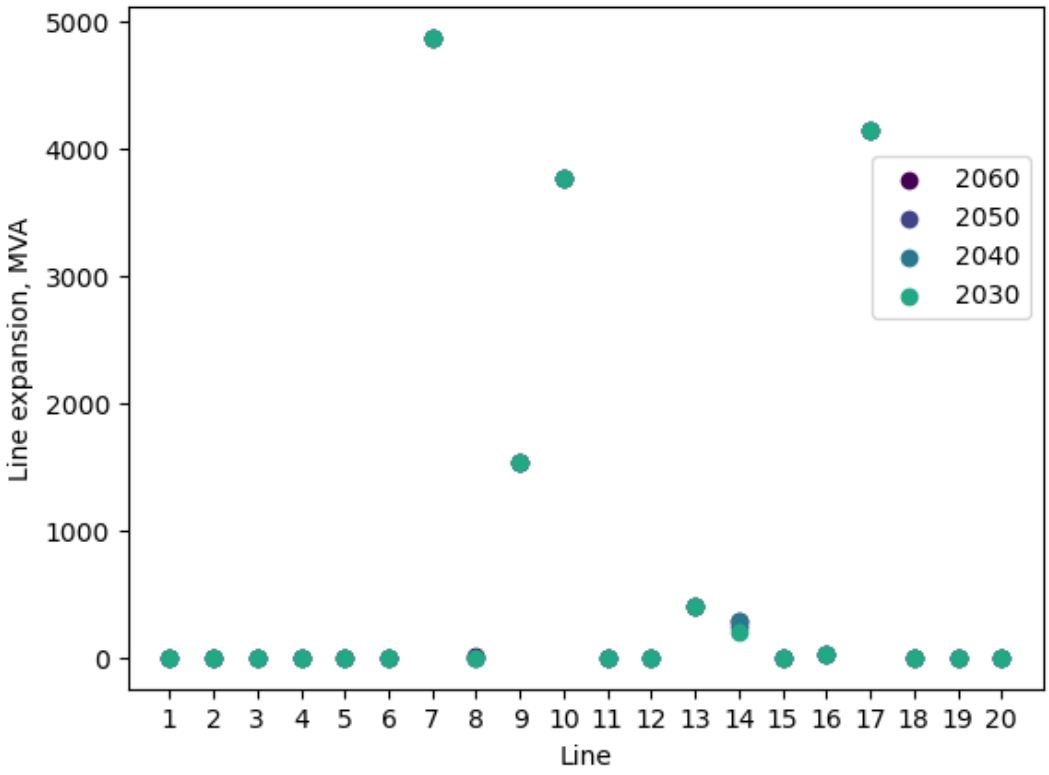


Рисунок 1.3.18 Оптимальное увеличение пропускной мощности линий электропередач между регионами в базовом сценарии.

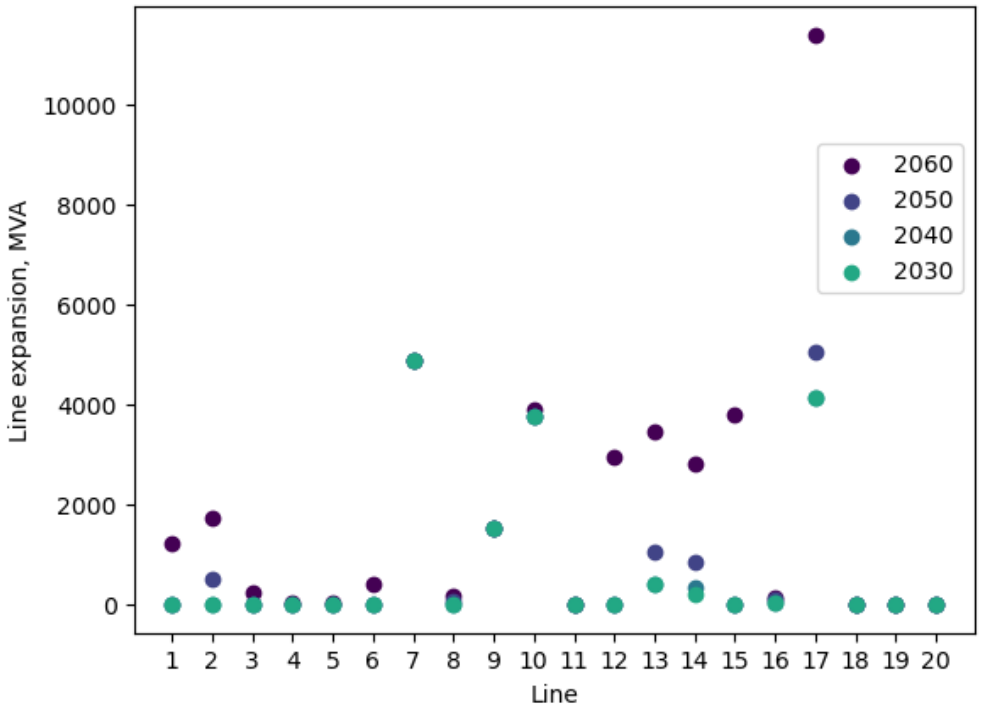


Рисунок 1.3.19. Оптимальное увеличение пропускной мощности линий электропередач между регионами в сценарии углеродной нейтральности

На рисунках выше показано, какие линии требуют увеличения пропускной способности по годам. Самое большое увеличение пропускной способности в

обоих сценариях уже в 2030 году требуется на линиях 7, 10, 17 – между Алматинской и Жамбылской, Алматинской и Карагандинской, Карагандинской и Павлодарской областями. Данный тренд обусловлен значительным приростом возобновляемых источников энергии в Алматинской и Карагандинской областях, которые требуют балансировки за счет других генераций и нагрузок. В сценарии углеродной нейтральности требуются большие пропускные мощности, что обусловлено высоким процентом возобновляемых источников энергии во всей системе. Если в базовом сценарии все увеличение мощностей линий происходит в 2030 году и далее почти не меняется до 2060 года, в сценарии углеродной нейтральности прирост мощностей происходит поэтапно со значительными скачками в 2030 году и в 2060 году. Также в данном сценарии самый большой прирост мощности между Карагандинской и Павлодарской областями, так как эти области являются самыми крупными потребителями электроэнергии в Республике Казахстан и должны перейти с угольной генерации на возобновляемые источники энергии.

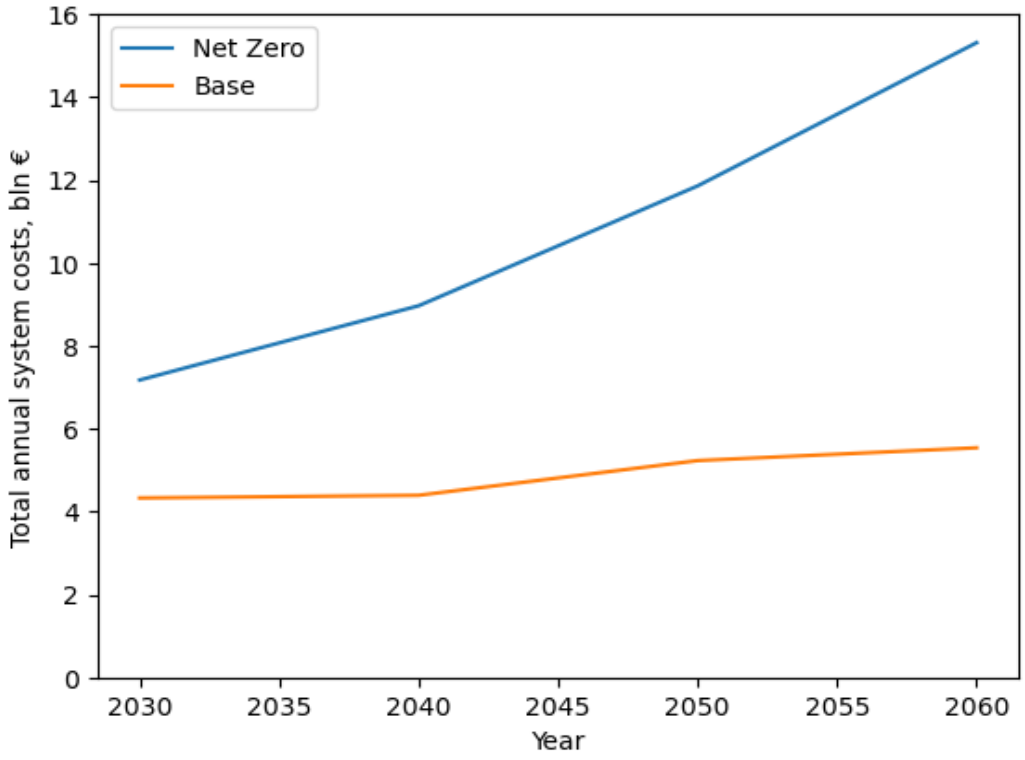


Рисунок 1.3.20. Общие капитальные затраты в годовом исчислении.

Рисунок 1.3.20 показывает общие капитальные затраты на сектор электроэнергии, включая линии электропередач, в обоих сценариях. Энергетический переход в сценарии углеродной нейтральности увеличивает затраты в 3 раза к 2060 году в сравнении с базовым сценарием. Рисунок 1.3.21 и Рисунок 1.3.22 показывают, как распределены капитальные затраты по

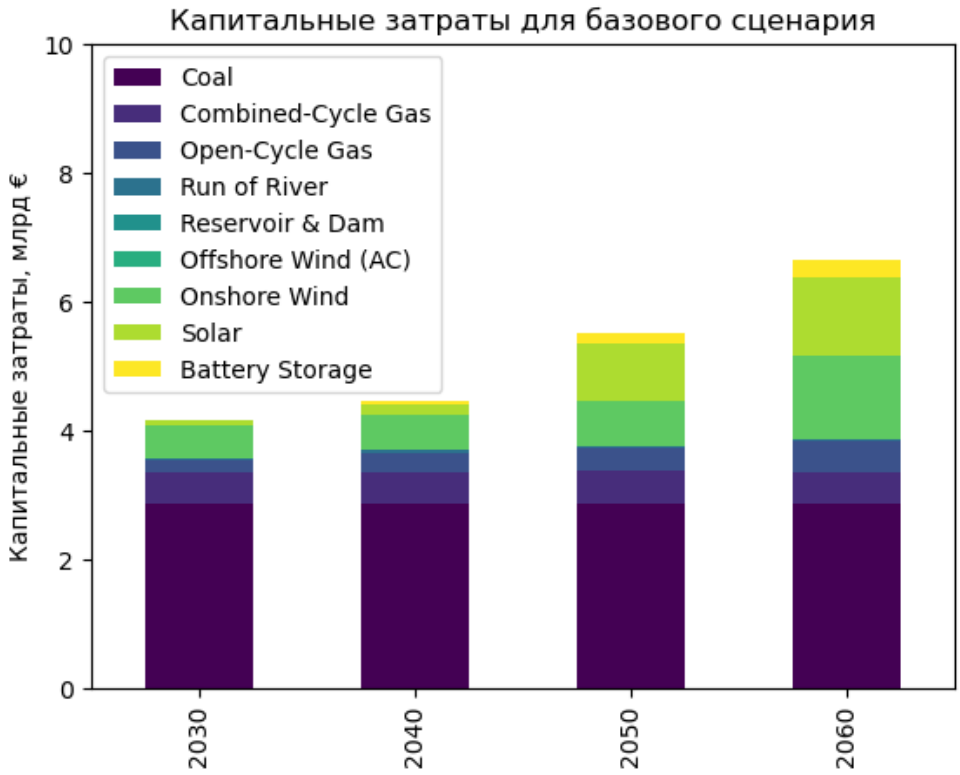


Рисунок 1.3.21. Капитальные затраты на каждую технологию в базовом сценарии

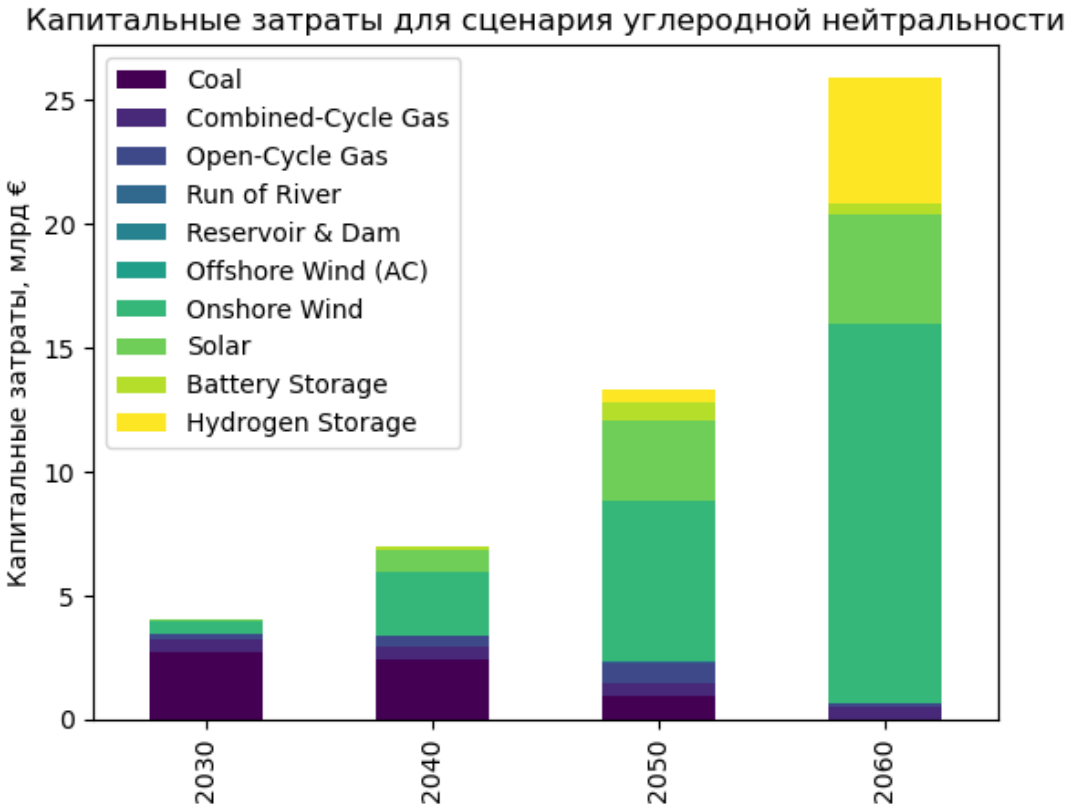


Рисунок 1.3.22. Капитальные затраты на каждую технологию в сценарии углеродной нейтральности

технологиям генерации и хранения для каждого сценария. В среднем, затраты растут пропорционально установленным мощностям. Рост возобновляемых

источников энергии, особенно при электрификации экономики, нуждается в интенсивных вложениях и инвестициях для достижения 100% снижения выбросов сектора электроэнергии к 2060 году.

1.4. Заключение

PyPSA – активно развивающаяся среда для моделирования энергетики и электроэнергетики с открытым исходным кодом. Она обеспечивает прозрачность и удобство для пользователя, что делает ее более популярной среди сообщества моделистов. Для Республики Казахстан модель PyPSA только на стадии разработки, но уже показывает свою универсальность и гибкость в плане формулировки задач. Различные сценарии могут быть промоделированы и сравнены между собой для выведения оптимальных политик в отношении декарбонизации страны и региона Средней Азии.

Моделирование сценария углеродной нейтральности показывает, что в Республике Казахстан есть огромный потенциал для развития возобновляяемых источников энергии, и что Казахстан способен обеспечить растущую потребность в электроэнергии за счет имеющихся ресурсов. Также результаты подчеркивают необходимость капиталовложения в укрепление инфраструктуры для обеспечения перетоков электроэнергии между регионами с различными типами возобновляяемых источников энергии и погодными условиями. Чтобы сократить выбросы до нуля к 2060 году, помимо строительства электростанций на возобновляяемых источниках энергии необходимы значительные вложения в системы хранения и в увеличение линий электропередач между регионами. Для достижения цели углеродной нейтральности возобновляяемые источники энергии и системы хранения электроэнергии необходимо внедрять во всех регионах Республики Казахстан без исключения.

PyPSA имеет широкий потенциал применения, в дальнейших работах планируется ввести многопериодное моделирование и анализ устойчивости результатов оптимизации к неопределенности в переменных, моделирование сценариев строительства атомных электростанций и расширения линий электропередач для связи западного региона с остальными. Многопериодное моделирование также поможет в долгосрочном планировании инвестиций, так как оно предотвратит лишние перераспределения установленных мощностей между регионами. В дальнейшей работе с PyPSA для Республики Казахстан есть возможность моделирования всего сектора энергетики, как это было сделано ранее для Европы, включая сектор транспорта, индустрии, жилищно-коммунального хозяйства и так далее.

2. Введение в TIMES

Республика Казахстан, как многие другие страны, стоит перед серьезным вызовом в виде последствий климатических изменений, с которыми она столкнулась начиная с середины XX века. Согласно научным данным, начиная с 1940 года, температурные показатели в Республике Казахстан постоянно меняются. Средняя годовая температура в стране растет со скоростью 0,28 °C в десятилетие, и этот рост становится особенно ощутимым в осенние месяцы, достигая 0,31 °C каждые 10 лет.

Однако не только температурные показатели вызывают озабоченность. Кроме температурного роста, в стране фиксируется уменьшение среднегодовых осадков. Этот спад составляет более чем 0,2 мм в десятилетие, что может оказывать негативное воздействие на сельское хозяйство и водные ресурсы страны.

Прогнозы на будущее тоже не радуют. Анализируя текущие тренды и моделируя возможные сценарии, ученые пришли к выводу, что к 2050 году Республика Казахстан может столкнуться с ростом среднегодовой температуры в диапазоне от 2,4 до 3,1 °C. Если проследить дальше по временной шкале, то к 2100 году этот рост может достигнуть отметки в 3,2-6,0 °C по сравнению со средними показателями за период 1980-1999 годов. Эти изменения могут повлечь за собой серьезные экологические, экономические и социальные последствия для населения Республики Казахстан.

Технико-экономическое моделирование энергетической системы с использованием генератора моделей TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System или «Интегрированная система MARKAL-EFOM») в Республике Казахстан началось еще в 2009 году, и с того времени оно активно развивалось. TIMES — это инструмент, который стал незаменимым в исследовательской деятельности в области энергетики.

На протяжении долгих лет, начиная с момента ее первого внедрения, модель энергетической системы претерпела множество изменений и улучшений. Основной целью ее использования стало создание научных публикаций, а также подготовка аналитических материалов для различных проектов.

Не менее важным стало использование модели TIMES для разработки Стратегии по достижению углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года, которая была официально принята 2 февраля 2023 года. Этот документ стал еще одним подтверждением актуальности и важности технико-экономического моделирования в решении ключевых энергетических и экологических задач страны.

В рамках масштабного проекта, названного «Поддержка зеленой экономики в Республике Казахстан и Центральной Азии с акцентом на низкоуглеродное экономическое развитие - Моделирование экономических, экологических и социальных последствий низкоуглеродного экономического развития в Республике Казахстан», была проведена серьезная работа по анализу и исследованию возможностей для устойчивого и низкоуглеродного экономического роста в Республике Казахстан. Это исследование является частью глобальных усилий по борьбе с изменением климата и содействию устойчивому развитию.

Основной результатом этой работы стала разработка обновленной модели энергетической системы TIMES-Казахстан. Эта модель предназначена для глубокого и комплексного анализа альтернативных вариантов развития энергетического сектора страны. С помощью этой модели исследователи в области изменении климата могут рассмотреть различные сценарии и пути развития энергетической инфраструктуры страны, учитывая множество переменных и факторов.

Особенностью модели TIMES является ее способность проектировать развитие энергетического сектора на длительный временной горизонт, вплоть до 2060 года. Это позволяет учитывать долгосрочные тренды, изменения в экономической и экологической среде, а также прогнозировать социальные последствия разных стратегий развития. Таким образом, благодаря этой модели, принятие решений в сфере энергетики может стать более обоснованным и устойчивым.

В настоящее время модель TIMES-KAZ находится в активной стадии эксплуатации, поддерживая свою актуальность и релевантность. Регулярно осуществляется мониторинг ее состояния, обеспечивая своевременные обновления и калибровку. Эти обновления основаны на последних данных, касающихся экономики Республики Казахстан. Кроме того, учитываются свежие данные о новых технологических разработках и инновациях, которые становятся доступными для внедрения. Это позволяет модели оставаться в гармонии с текущими трендами и адаптироваться к меняющемуся контексту. Таким образом, модель TIMES-KAZ представляет собой гибкий и динамичный инструмент, который активно реагирует на любые изменения во внешнем окружении, будь то экономические показатели или новые технологические решения.

В представленном отчете детально рассмотрены сложные математические модели и оценки, основанные на двух основных предполагаемых сценариях: базовом и климатическом. Эти прогнозные модели основываются на оценке потенциальных последствий разнообразных государственных стратегий и политик, имеющих прямое или косвенное влияние на процесс уменьшения выбросов парниковых газов, которые способствуют усилению парникового эффекта и вызывают климатические изменения.

Для начала специалистами был организован тщательный анализ чувствительности различных параметров, чтобы выявить наиболее важные из них в контексте данной проблематики. В процессе анализа особое внимание уделялось валовому внутреннему продукту, так как он представляет собой основной экономический показатель, отражающий общий объем производства и потребления в стране. Таким образом, уровень валового внутреннего продукта напрямую коррелирует с уровнем промышленной деятельности, производственными процессами и, как следствие, с объемом выбросов парниковых газов в атмосферу.

После этапа моделирования последовал этап аналитического расчета. Основной задачей этого расчета была оценка того, насколько эффективно предложенные стратегии могут помочь в снижении уровней выбросов парниковых

газов. Эта оценка необходима для понимания реальной эффективности предложенных методов в борьбе с изменением климата.

При составлении отчета учитывались не только те методики и подходы, которые применяются на текущий момент для уменьшения уровня выбросов, но также исследовались возможные направления их будущего развития. Таким образом, этот отчет предоставляет глубокий и многоаспектный анализ актуальной проблемы.

Благодаря проведенному моделированию и анализу данных, лица принимающие решения могут делать выводы о том, насколько эффективными могут оказаться те или иные политические решения и стратегические направления в экологической сфере. Это, в свою очередь, позволит принимать более взвешенные решения, целью которых является максимальное снижение выбросов парниковых газов, а также обеспечение устойчивого и экологически безопасного будущего для нашей планеты.

Достижение амбициозных климатических целей является огромным и важным вызовом не только для Республики Казахстан, но и для всего мирового сообщества. Серьезное и продуманное сокращение выбросов парниковых газов является задачей, стоящей перед всеми странами и требующей фундаментальных изменений в традиционных моделях производства и потребления. Это подразумевает быстрый, эффективный и продуманный переход от привычного и неэкологичного сжигания ископаемых энергоресурсов к современным и безуглеродным технологиям. Кроме того, нужно активное и масштабное внедрение «зеленых» инноваций в различные сектора экономики: промышленность, транспорт, строительство, сельское и лесное хозяйство, а также в систему управления отходами.

2.1. Методы исследования

Системный анализ является важным инструментом, который активно используется лицами, принимающими решения. Основной задачей системного анализа является облегчение процесса принятия решений в сложных вопросах, таких как определение и количественное выражение характеристик энергетической системы. Кроме того, он играет ключевую роль в оценке и сравнении влияния различных решений и вариантов на функционирование данной системы.

В рамках системного анализа, производится активный поиск оптимальных режимов работы энергетических систем. Это включает в себя технико-экономическое моделирование и использование различных методов, таких как смешанно-целочисленное линейное программирование, чтобы обеспечить максимальную эффективность системы.

Моделирование энергетических систем предоставляет уникальную возможность для экспертов использовать формализованное и структурированное описание системы. Это позволяет глубоко анализировать различные аспекты, связанные с энергетической и экологической политикой. Стоит отметить, что моделирование охватывает обширный спектр моделей, которые могут быть

применены к энергосистемам различных масштабов и уровней сложности. При моделировании энергетических систем основополагающим является этап сбора и анализа данных. На этом этапе, ключевым моментом становится обеспечение того, чтобы данные были полными, согласованными и обладали необходимой глубиной и точностью для дальнейшего использования в модели.

Модель TIMES-KAZ – это целостная технологическая модель «снизу вверх», использующая линейное программирование на средне- и долгосрочных временных горизонтах для создания наименее затратной энергетической системы, оптимизированной в соответствии с рядом пользовательских ограничений. Модель TIMES-KAZ описывает развитие энергетической системы в Республике Казахстан с подробной информацией об имеющихся технологиях и их стоимости.

Модель TIMES-KAZ используется для исследования возможного энергетического будущего на основе различных сценариев. Для анализа использовалась обновленная в 2021 году версия расширенной модели TIMES-KAZ, в которую дополнительно был введен набор передовых технологий, таких как производство водорода и использование геотермальной энергии.

Сильной стороной модели является детальное представление на технологическом уровне всех секторов сжигания, представляющих интерес с точки зрения снижения выбросов парниковых газов. Однако надо учитывать, что модель не учитывает взаимодействие секторов сжигания на остальные отрасли экономики, и, соответственно не может учитывать межсекторальное взаимодействие с ними.

На предоставленном ниже рисунке демонстрируется референтная энергетическая система с акцентом на секторальное потребление энергоресурсов. Есть технологические методы доставки энергии, использующие такие ресурсы как уголь, газ, нефтепродукты и электричество. Эти ресурсы получены через отдельные процессы, отражённые на диаграмме в разделе трансформации. Завершая систему, изображение также показывает первичные источники энергии: месторождения угля, природного газа, биотоплива, атомной и возобновляемой энергии.

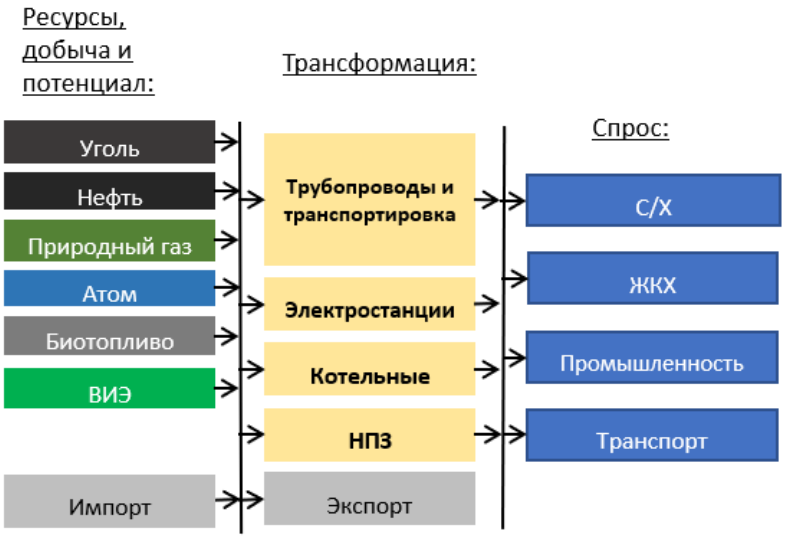


Рисунок 2.1.1. Референтная энергетическая система (РЭС)

Модель TIMES-KAZ может использоваться как для расчета количественных оценок по отдельности, так и в совокупности. Причем в последнем случае может происходит взаимодействие политик и мер, тем самым изменяются эффекты на снижение выбросов парниковых газов.

Подробная информация по семейству моделей TIMES доступна на сайте Международного энергетического агентства [1].

2.2. Формулировка сценариев выбросов парниковых газов

В данном разделе мы детально займемся рассмотрением информации, которая касается двух ключевых сценариев: базового и климатического. Эти сценарии не просто абстрактные концепции, они представляют собой разнообразные подходы, методики и стратегии, которые используются с целью достижения конкретных результатов и целей. В процессе выбора наиболее подходящих мер и решений большое внимание уделялось их потенциалу по снижению уровня выбросов парниковых газов в атмосферу.

Главной задачей данного исследования является выявление наиболее эффективных, а также оптимальных способов уменьшения тех выбросов, которые напрямую или косвенно влияют на изменение климата на нашей планете. Это особенно важно в контексте текущих глобальных экологических проблем и необходимости срочных действий для их решения.

Климатические сценарии – это представления о возможных изменениях климата в будущем на основе различных предположений об экономическом росте, населении, технологиях и других факторах, которые могут влиять на концентрацию парниковых газов в атмосфере. Они являются ключевым инструментом для понимания потенциальных изменений климата и их последствий.

При создании климатических сценариев эксперты используют комплексные различные модели, которые учитывают множество параметров. В эти модели вводятся данные о будущем, основанные на различных экономических, демографических и технологических трендах.

При формулировании сценариев учитываются различные факторы, такие как рост производства и потребления энергии, изменение лесопользования, рост населения и урбанизации. На основе этих данных прогнозируется выпуск парниковых газов в будущем.

Существует множество различных климатических сценариев, отражающих разные уровни оптимизма или пессимизма относительно нашей способности сократить выбросы парниковых газов. Некоторые сценарии предполагают быстрое развитие технологий и активные меры по сокращению выбросов, в то время как другие представляют собой "деловые как обычно" подходы без значительных изменений в текущих тенденциях.

[1] https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times

Климатические сценарии нужны для множества целей. Во-первых, они позволяют правительствам, компаниям и обществу в целом понимать риски, связанные с изменением климата, и планировать соответствующие меры адаптации. Во-вторых, сценарии помогают предсказать потенциальные последствия для биоразнообразия и экосистем. В-третьих, они могут быть использованы для образовательных и просветительских целей, чтобы информировать общественность о возможных последствиях климатических изменений.

Используя сценарии, правительства и организации могут разрабатывать стратегии адаптации, например, строительство защитных сооружений от поднятия уровня моря или создание новых сортов растений, устойчивых к изменяющемуся климату. Также сценарии могут указывать на необходимость сокращения выбросов парниковых газов и разработки новых технологий.

По мере поступления новой информации и улучшения моделей, климатические сценарии регулярно пересматриваются и обновляются, чтобы отражать последние данные и прогнозы.

Климатические сценарии играют ключевую роль в понимании потенциальных изменений в нашем климате и формировании решений, направленных на смягчение и адаптацию к этим изменениям. Они служат мостом между сложной научной информацией и практическими действиями, которые необходимо предпринимать на всех уровнях общества.

2.3. Общие предположения для всех сценариев

В исследовании мы учитываем несколько основных общих предположений, которые служат отправной точкой для всех наших сценарных анализов. Вот ключевые элементы этих предположений:

Первым и основным параметром является валовый внутренний продукт. В соответствии с Прогнозом социально-экономического развития Республики Казахстан, разработанным Министерством национальной экономики Республики Казахстан (МНЭ РК), ожидается, что валовый внутренний продукт будет расти в период 2024-2028 годов. После этого периода мы прогнозируем стабильный ежегодный рост на уровне 5,0% до конца рассматриваемого периода.

Еще одним важным фактором является рост населения. Ссылаясь на тот же Прогноз социально-экономического развития от Министерства национальной экономики Республики Казахстан, мы ожидаем, что численность населения будет увеличиваться в период 2024-2028 годов. После этого демографические тенденции будут продолжаться, и ежегодные темпы роста населения будут колебаться в пределах 0,8-0,9% в год.

С точки зрения промышленного развития, наш анализ также учитывает добычу нефти. Прогнозируется, что объем добычи нефти будет стабильно расти и достигнет своего пика в размере 115 миллионов тонн к 2035 году. Этот пик будет важным моментом для экономики страны, так как нефтедобыча играет ключевую роль в экономическом развитии Республики Казахстан.

Эти общие предположения являются краеугольным камнем нашего анализа, и они помогут нам понять возможные траектории социально-экономического развития страны в ближайшие годы.

2.3.1. Базовый сценарий

В представленном сценарии акцентируется внимание на ключевых принятиях и политических решениях, направленных на контроль и минимизацию выбросов парниковых газов в атмосферу. Эти меры и стратегии являются результатом глубоких исследований и анализа текущей экологической ситуации:

Один из важных пунктов этого сценария касается производства электроэнергии с использованием природного газа. Планируется, что доля такой выработки составит 20% от общего объема в 2020 году. К 2030 году ожидается небольшое увеличение этого показателя до 25%. Это связано с относительной экологичностью природного газа в сравнении с другими видами топлива.

Следующий момент касается доли электроэнергии, производимой за счет возобновляемых источников энергии. Согласно данной стратегии, к 2020 году доля возобновляемых источников энергии в общем объеме выработки электроэнергии должна достичь 3%. Ожидается, что к 2025 году этот показатель возрастет до 6%, и к 2030 году доля возобновляемых источников энергии в общем балансе электроэнергетики составит 15%. Это демонстрирует стремление к устойчивому и экологически чистому производству энергии.

Что касается других направлений в области экологии и энергетики, то на данный момент не предусмотрено конкретных ограничений или жестких рамок. Это может быть связано с желанием оставить простор для инноваций и поиска новых решений в соответствующих отраслях.

В целом, этот сценарий подчеркивает важность перехода к более чистым источникам энергии и осознание ответственности перед будущими поколениями.

2.3.2. Климатический сценарий

Этот сценарий предоставляет обзор разнообразных стратегий, мер и политических решений, которые могут быть приняты для решения одной из наиболее актуальных проблем нашего времени - выбросов парниковых газов. Главной и неотъемлемой целью этих инициатив является прямое и максимально эффективное снижение уровня этих выбросов, которые стали основной причиной изменений климата на нашей планете.

Для достижения таких конкретных и желаемых результатов в данном сценарии были применены особые и специфические сценарные ограничения. Кроме этого, был проведен анализ, который продемонстрировал, как модель энергетической системы реагирует на такие интервенции.

Необходимо особо подчеркнуть, что применяемый в данном исследовании методологический подход, который базируется на использовании сценарных ограничений, а затем проведении последующего анализа реакции модели,

считается стандартом в области моделирования и исследований. Применение такой методологии не только помогает в глубоком понимании проблемы, но и способствует выявлению наиболее эффективных, а также экономически и экологически оптимальных стратегий развития. Все это направлено на то, чтобы максимально эффективно бороться с негативными последствиями изменения климата и сокращением выбросов парниковых газов в атмосферу нашей планеты.

2.4. Анализ системы на чувствительность

В процессе проведения исследования, касающегося анализа чувствительности системы, было выполнены детальные расчеты. Это было сделано с целью изучения того, как изменение определенных выбранных параметров может повлиять на работу и реакцию энергетической системы. Было стремление понять, насколько система чувствительна к внешним воздействиям и какие конкретно параметры оказывают наибольшее влияние на ее стабильность и эффективность. Таким образом, основная задача исследования заключалась в определении уровня адаптивности и устойчивости системы при различных внешних условиях.

Энергетическая система – это сложная структура, состоящая из множества взаимосвязанных компонентов, работающих синхронно для обеспечения надежного и эффективного поставщика энергии. Постоянно меняющиеся экономические, социальные, технологические и экологические условия создают ряд неопределенностей при прогнозировании будущего поведения энергетической системы.

Анализ чувствительности является ключевым инструментом для оценки, насколько изменение одного или нескольких экзогенных параметров может повлиять на результаты модели. Параметры, выбираемые для анализа, обычно являются внешними для системы параметрами, которые могут существенно влиять на ее результаты. Примерами таких параметров могут быть темпы экономического роста, цены на оборудование и эксплуатационные оперативные расходы, включая цены на топливо, и другие.

Понимание чувствительности модели к этим параметрам не только помогает уточнить прогнозы, но и выявляет потенциальные угрозы и возможности, связанные с изменениями внешних условий. Это, в свою очередь, позволяет принимать обоснованные решения в области энергетики и стратегического планирования.

Рост валового внутреннего продукта отражает общее экономическое развитие страны и может иметь существенное влияние на развитие энергетической системы, потребление энергии, инвестиции в энергетическую инфраструктуру и другое. Принято предположение, что рост валового внутреннего продукта до 2028 года развивается согласно прогнозам Министерства национальной экономики Республики Казахстан, представленным в Прогнозе социально-экономического развития Республики Казахстан на 2024–2028 годы[2] (ПСЭР МНЭ РК). В

[2] https://www.gov.kz/memleket/entities/economy/documents/details/470539?lang=ru

соответствии с прогнозами, начиная с 2029 года, в базовом сценарии ожидается увеличение экономических показателей на 5%, что является ключевым условием для того, чтобы наша страна вошла в рейтинг тридцати быстрорастущих стран мира. При разработке сценария, который учитывает чувствительность к изменениям валового внутреннего продукта, все рассматриваемые темпы роста были увеличены на один процентный пункт (п.п.) с целью тщательного анализа возможных последствий таких изменений для структуры энергетической системы страны.

Следует подчеркнуть и выделить важность того факта, что, исходя из текущих прогнозов и ожидаемых темпов экономического роста, к 2060 году мы можем столкнуться со значительным уровнем роста валового внутреннего продукта страны. Если сравнивать с показателями 2021 года, величина валового внутреннего продукта увеличится в 6,6 раз в базовом сценарии, который принимает во внимание стандартные условия развития. Однако, если рассматривать более специфический сценарий, который учитывает чувствительность экономики к различным внешним и внутренним факторам, особенно к валовому внутреннему продукту, то рост может достигнуть отметки в 9,6 раз.

Такой уровень не просто демонстрируют потенциальное увеличение экономической активности страны, но и подчеркивают, насколько важно будет приспосабливать и модернизировать отрасли, особенно энергетическую в альтернативных условиях развития. Подобное масштабное развитие будет несомненно оказывать давление на энергетическую инфраструктуру, требуя от грамотного планирования и инвестиций, чтобы обеспечить стабильное и устойчивое энергоснабжение.

Таблица 2.4.1. Предположения по ежегодным темпам реального роста валового внутреннего продукта в базовом сценарии и сценарии чувствительности

	Факт		Прогноз МНЭ (ПСЭР)					Предположения
	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029 - 2060
Базовый сценарий	2.1%	4.0%	5.0%	5.5%	5.1%	5.7%	6.0%	5.0%
Сценарии чувствительности к темпам роста ВВП, (плюс 1 п.п.)	3.1%	5.0%	6.0%	6.5%	6.1%	6.7%	7.0%	6.0%

Стоит отметить, что данные изменения темпов роста валового внутреннего продукта будут иметь значительные последствия для будущего страны, особенно в контексте увеличения потребности в энергетических ресурсах. По мере увеличения экономической активности возрастает и потребность в энергии, что требует серьезного пересмотра стратегии развития энергетического сектора. Это демонстрирует важность правильного прогнозирования и планирования для

обеспечения стабильности и устойчивости энергетической системы в долгосрочной перспективе.

Таким образом, анализируя представленные базовые предположения и сценарные условия, мы получаем отправную точку для дальнейшего изучения и оценки чувствительности модели энергетической системы. Они помогают нам прогнозировать, какие итоговые результаты можно ожидать при возможном изменении ключевых параметров, что в свою очередь, позволяет более точно понимать, как наша модель будет вести себя в различных сценариях, а также предвидеть возможные проблемы или выявить потенциальные области для улучшения. Эти базовые предположения и сценарные условия предлагают нам надежную платформу для создания более точных прогнозов и планирования стратегий оптимизации работы энергетической системы в будущем.

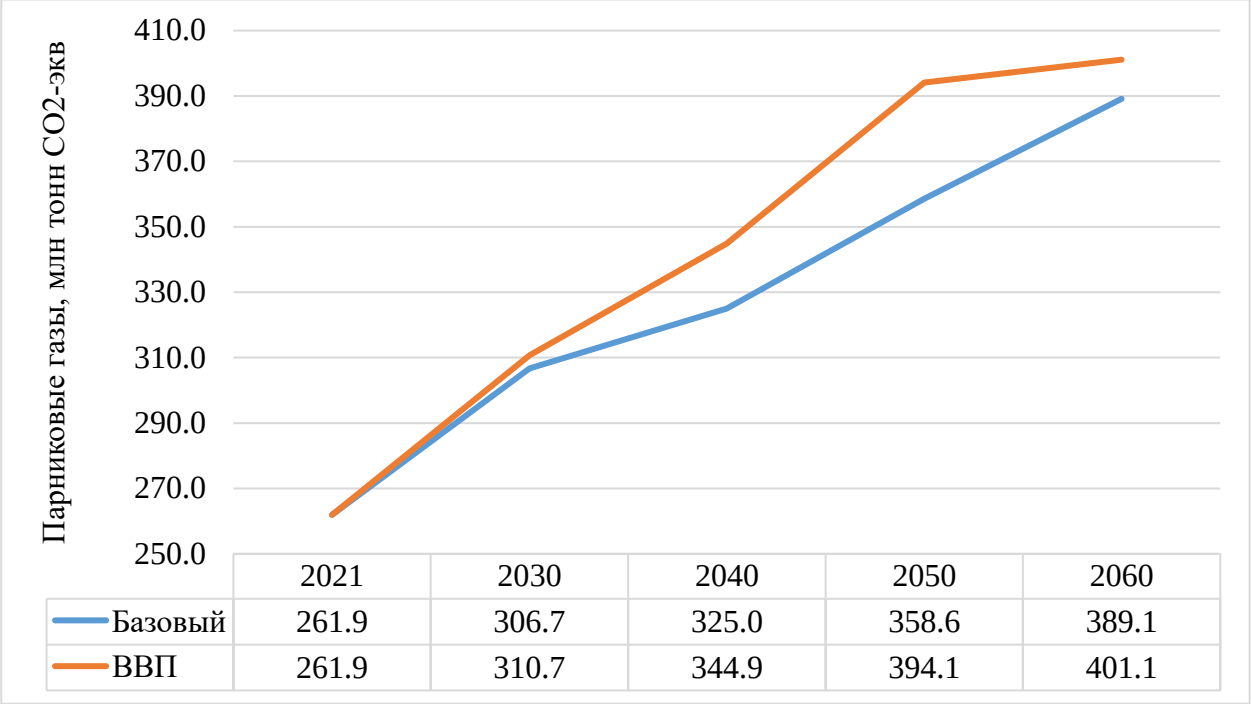
Результаты анализа системы на чувствительность

График, который представлен ниже, дает понимание динамики выбросов парниковых газов в соответствии с сценарием чувствительности, особенно в контексте сектора энергетики. Сценарий чувствительности акцентирует внимание на всех выбросах, прямо связанных с процессом сжигания различных видов топлива в разных экономических секторах.

Однако стоит заметить, что в рассмотренной модели энергетической системы определенные источники выбросов были исключены из анализа. В частности, модель не учитывает выбросы от секторов, которые не имеют прямого отношения к сжиганию топлива. К таким секторам можно отнести промышленные процессы, которые не включают в себя сжигание топлива, активности в сельском хозяйстве, а также процессы утилизации и обработки отходов.

Данные за 2021 год показывают, что сектор энергетики играет ключевую роль в общем объеме выбросов парниковых газов на территории страны. Согласно представленной информации, этот сектор вносит вклад в размере 77% от общего числа выбросов на национальном уровне. Это подчеркивает важность этого сектора при разработке стратегий по снижению выбросов парниковых газов и борьбе с изменением климата.

Как ясно иллюстрирует представленный график, эмиссии парниковых газов в среднем растут в полтора раза к 2060 году во всех анализированных сценариях по сравнению с данными 2021 года. Заметная реакция на изменение исходных параметров начинает проявляться после 2030 года во всех сценариях чувствительности, и начиная с этого критического момента, прогнозы по эмиссиям парниковых газов становятся разнообразными и различными.



	2021	2030	2040	2050	2060
Базовый	261.9	306.7	325.0	358.6	389.1
ВВП	261.9	310.7	344.9	394.1	401.1

Рисунок 2.4.1. Выбросы парниковых газов по сценариям, млн тонн CO2-экв.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что экономическая оценка, основанная на валовом внутреннем продукте, играет неотъемлемую роль в анализе и прогнозировании выбросов парниковых газов. Это объясняется тем, что валовый внутренний продукт является своего рода индикатором, отражающим общий уровень экономической активности, который напрямую связан с потреблением энергии и, следовательно, уровнем выбросов парниковых газов. Именно поэтому, работа по созданию точных прогнозов в отношении валового внутреннего продукта, а также анализ влияния различных факторов на его изменение, являются критически важными аспектами при формировании стратегий развития энергетического сектора. Так, разработка реалистичных сценариев развития энергетического сектора требует глубокого понимания механизмов взаимодействия экономической и энергетической систем, что, в конечном итоге, позволяет более точно оценить возможные изменения в уровне выбросов парниковых газов.

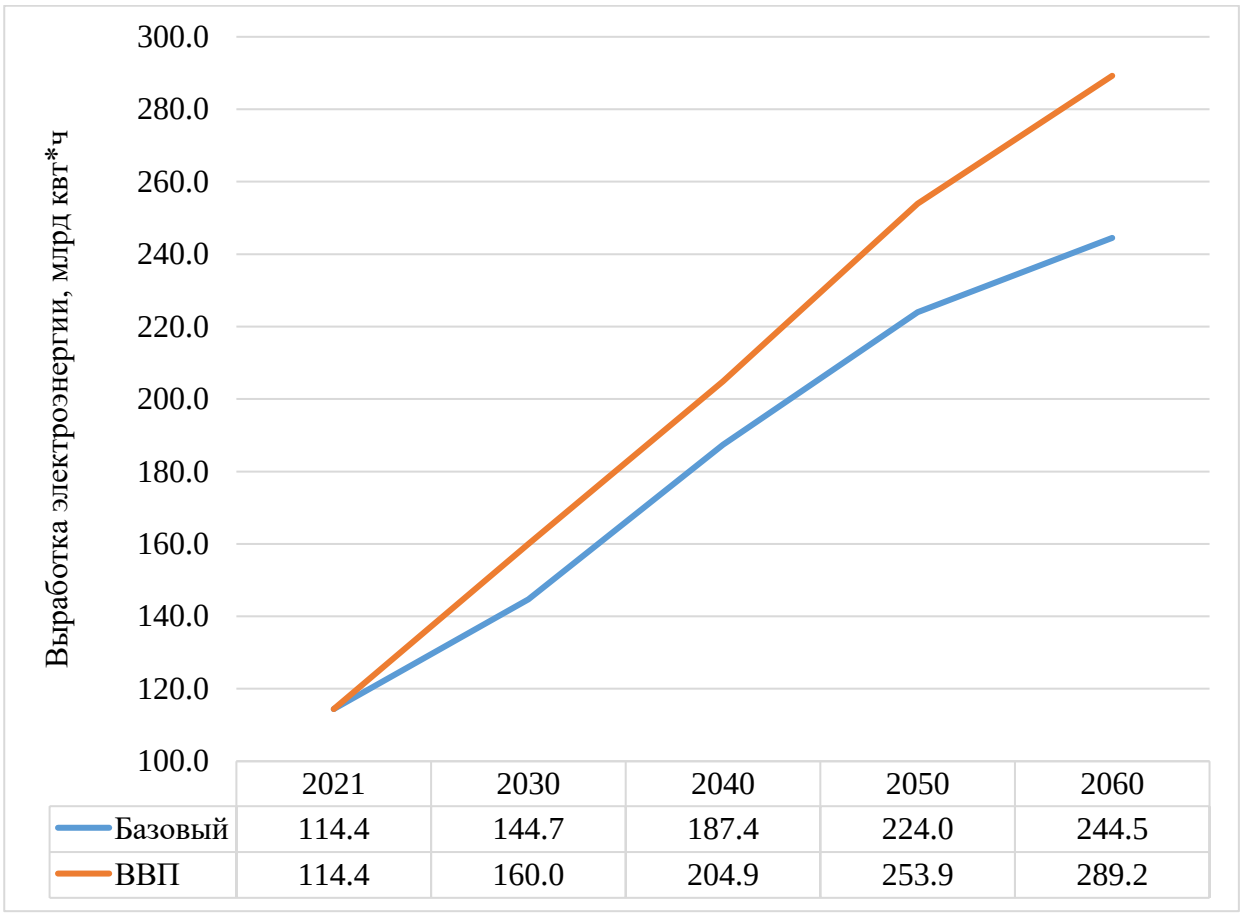
Основываясь на вышеописанном, можно выделить несколько ключевых моментов, отраженных на графике. В первую очередь, рост эмиссий парниковых газов является заметным и единым трендом на протяжении рассматриваемого периода во всех сценариях, что указывает на продолжающееся усиление данной проблемы. Вторым важным аспектом является то, что различия в прогнозах по эмиссиям парниковых газов начинают значительно проявляться после 2030 года, подчеркивая тем самым критическую важность ближайшего десятилетия в контексте принятия мер по сокращению эмиссий парниковых газов.

Ниже представлен график с уровнями выработки электроэнергии по сценариям от сектора производства энергетики.

Уровень выработки электроэнергии, по всем проанализированным сценариям, продемонстрировал тенденцию к увеличению: в среднем на 20% к 2030 году в

сравнении с 2021 года, и более чем в два раза к 2060 году. Это напрямую связано с осознанием важности данного вида энергии для эффективного функционирования и развития экономической системы страны. Преобразование электроэнергии в различные формы полезной энергии играет ключевую роль в современном обществе, обеспечивая возможность реализации многих технологических процессов.

При этом, как показывает анализ, повышенный рост валового внутреннего продукта требует большего количества электроэнергии. Это обусловлено увеличением производительности труда, расширением производственных мощностей и усилением технологических процессов, что ведет к более высокому потреблению энергии. Более того, растущий спрос на электроэнергию отражает стремление к улучшению качества жизни населения и обеспечению более высокого уровня комфорта в быту и на производстве.



	2021	2030	2040	2050	2060
Базовый	114.4	144.7	187.4	224.0	244.5
ВВП	114.4	160.0	204.9	253.9	289.2

*Рисунок 2.4.2. Выработка электроэнергии по сценариям, млрд квт*ч*

Также стоит отметить, что разработка и внедрение новых, более эффективных технологий в области энергетики, способствует оптимизации процесса выработки и потребления электроэнергии. Это, в свою очередь, позитивно сказывается на экономической эффективности и устойчивости экономической системы в целом. Эволюция энергетической отрасли оказывает заметное влияние на социально-экономическое развитие, создавая благоприятные условия для устойчивого роста экономики и улучшения благосостояния населения.

Представляет большой интерес выработка электроэнергии по видам топлива и типам технологий. Ниже представлен график, представляющий такую информацию по сценариям. Также представлена таблица, показывающая структуру выработки.

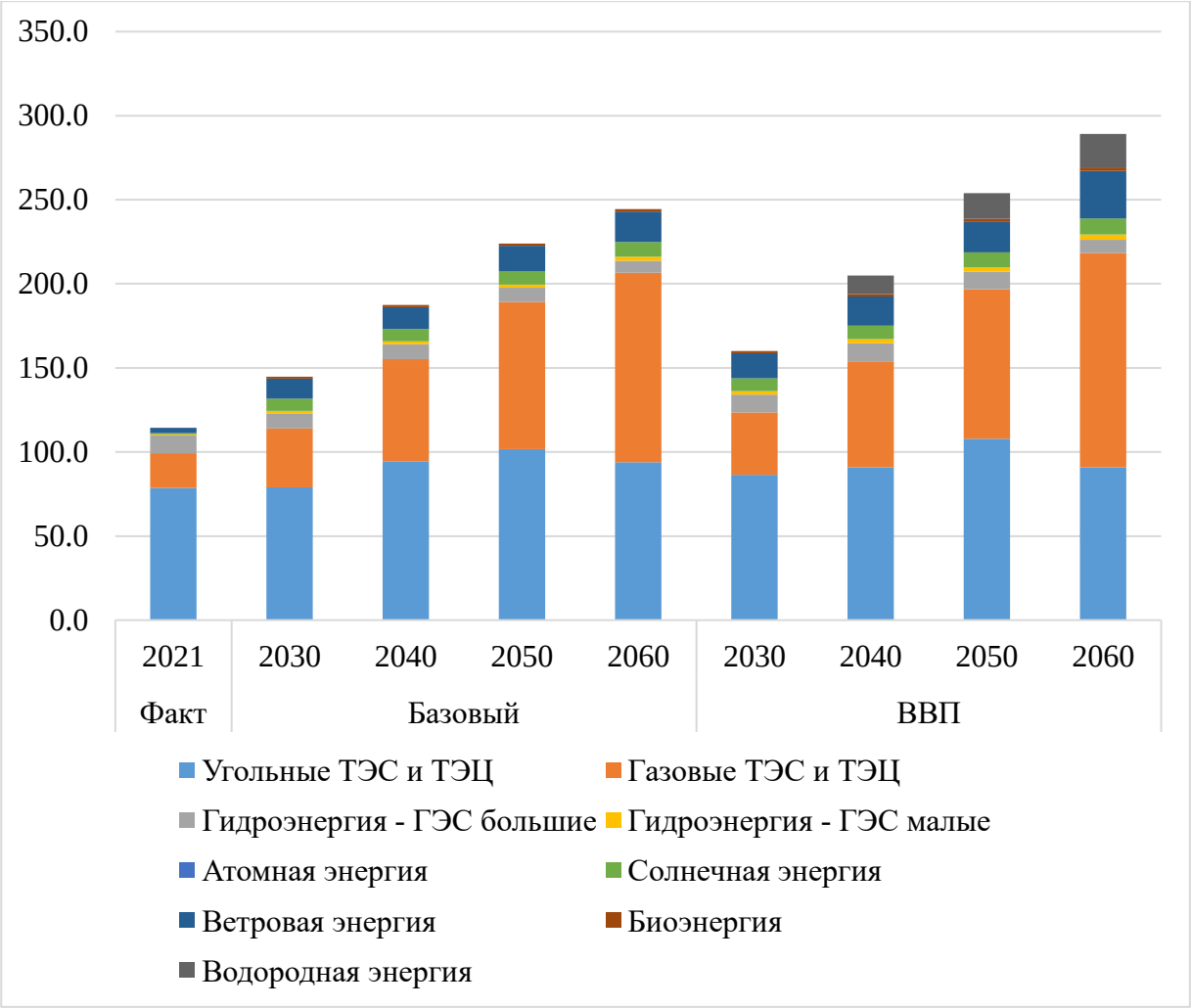


*Рисунок 2.4.3. Выработка электроэнергии по сценариям, по видам топлива и типам технологий, млрд квт*ч*

В данном анализе ясно прослеживается, что, несмотря на различные рассматриваемые сценарии, абсолютные показатели использования угля при производстве электричества продолжают расти вплоть до 2050 года. После этого года, как показывают прогнозы, начинается небольшое снижение уровня потребления этого ископаемого. Однако, если взглянуть на относительную структуру генерации электроэнергии, становится заметно, что доля угля в ней сокращается.

Таблица 2.4.2. Структура выработки электроэнергии по сценариям, по видам топлива и типам технологий, %

	Факт	Базовый				Валовый внутренний продукт			
	2021	2030	2040	2050	2060	2030	2040	2050	2060
Угольные ТЭС и ТЭЦ	68.8	53.6	50.4	45.4	38.4	51.7	44.4	42.5	31.5
Газовые ТЭС и ТЭЦ	18.0	25.0	32.4	39.0	46.1	25.0	30.7	35.1	44.0
Гидроэнергия - ГЭС большие	9.3	6.3	4.8	3.8	2.9	6.8	5.3	4.1	2.8
Гидроэнергия - ГЭС малые	0.5	1.0	0.9	0.9	1.0	1.3	1.2	1.0	1.0
Атомная энергия	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Солнечная энергия	0.7	5.0	3.9	3.6	3.6	4.9	3.9	3.5	3.3
Ветровая энергия	2.7	8.3	6.9	6.7	7.4	9.6	8.4	7.1	9.8
Биоэнергия	0.0	0.7	0.6	0.6	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7
Водородная энергия	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4	6.0	6.9
Всего	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

С другой стороны, нельзя не заметить, что в последнее время все больше и больше стран начинают активно использовать электроэнергию, производимую на основе природного газа. К 2030 году ожидается, что доля такой электроэнергии достигнет порядка 25%, что само по себе является впечатляющим показателем. Однако к 2060 году этот показатель практически удваивается и составляет почти половину всей выработки электроэнергии.

Эти цифры говорят о том, что природный газ становится ключевым источником для производства электричества. Это особенно поразительно, учитывая, что в исследованных прогнозах и сценариях развития электроэнергетики не было установлено конкретной цели по увеличению выработки именно из природного газа. Такой тренд может указывать на то, что технологии, связанные с природным газом, предлагают более высокую эффективность или становятся более доступными для широкого применения.

Также это подчеркивает важность переориентации внимания в энергетической отрасли. Возможно, пришло время активно смотреть в сторону более экономически выгодных и экологически чистых технологий. В среднесрочной перспективе это может означать необходимость активных инвестиций в исследования и разработку, а также адаптацию инфраструктуры под новые требования времени.

Основываясь на данных, полученных в ходе анализа, можно сделать определенные выводы относительно будущих тенденций в сфере энергетики. Первостепенной является вероятность того, что в ближайшие десятилетия произойдет активный переход к более экологически устойчивым источникам

энергии. Это основано на стремлении мирового сообщества минимизировать вредное воздействие на окружающую среду и снизить уровень выбросов углекислого газа. Такой тренд, безусловно, будет способствовать снижению мировой зависимости от угля, который на данный момент является одним из основных и, к сожалению, наиболее вредных для экологии источников энергии. Вместо этого можно ожидать роста доли природного газа в общей структуре выработки электроэнергии. Природный газ представляет собой более чистый и эффективный источник энергии, что делает его привлекательной альтернативой для многих стран, стремящихся к устойчивому развитию и экологической безопасности.

Отмечено существенное снижение выработки энергии, получаемой из гидроресурсов, в последние годы. Это тенденция проявляется как в абсолютных значениях, так и при рассмотрении относительных показателей. Основные причины этого снижения связаны прежде всего с ограниченностью доступных нам водных ресурсов. Многие источники гидроэнергии имеют фиксированный ресурс, который, к сожалению, не обновляется в нужных объемах. Кроме того, стоит отметить и истекание срока эксплуатации многих действующих гидроэнергетических станций и оборудования. Эти факторы в совокупности приводят к тому, что доля гидроэнергии в общем энергетическом балансе страны уменьшается.

С другой стороны, наблюдается тенденция стабильного роста производства электроэнергии за счет применения альтернативных источников. В частности, речь идет о солнечной и ветряной энергетике, которые с каждым годом набирают все большую популярность. Это движение поддерживается не только глобальными тенденциями постоянного снижения стоимости соответствующих технологий, но и благодаря инновациям, усовершенствованию и повышению эффективности солнечных панелей и ветряных турбин. Таким образом, новые и современные подходы к выработке электроэнергии открывают широкие возможности и горизонты для всего энергетического сектора. Эти инновации и прогресс позволяют нам компенсировать потери, связанные со снижением производства электроэнергии из гидроресурсов, предоставляя альтернативные и более экологически чистые способы обеспечения потребителей энергией.

Более того, планируется активное внедрение технологии производства электроэнергии из водорода. Водород в последние годы все чаще рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений для дальнейшего инновационного развития мировой энергетики. Этот интерес обусловлен стремлением многих государств к декарбонизации своих энергосекторов в рамках глобальных экологических инициатив. Осознание и открытие потенциала водорода в качестве источника энергии может играть ключевую роль в создании более устойчивой, эффективной и гибкой энергетической инфраструктуры нашего будущего. Проявление интереса к водородным электростанциям связано также с ростом экономической выгодности использования водорода. Этот фактор становится особенно важным, учитывая, что многие ключевые компоненты или ресурсы, необходимые для других источников энергии, приходится

импортировать, что может вызывать различные экономические и геополитические риски.

В заключение анализа на чувствительность необходимо подчеркнуть, что такой анализ с изменением параметров, имеющих значимый интерес, может выявить, как параметр чувствительности воздействует на энергетическую систему, и, следовательно, сформулировать информированные рекомендации в отношении рисков, возможностей и стратегического планирования в данном секторе. Такой подход обеспечивает фундаментальное понимание того, какие факторы могут оказывать наибольшее влияние на энергетическую систему, и как лучше всего адаптировать стратегическое планирование для минимизации рисков и максимизации возможностей, связанных с будущим развитием энергетического сектора.

2.5. Результаты моделирования климатического сценария

Энергетический сектор Республики Казахстан играет ключевую роль в формировании экологического профиля страны, будучи крупнейшим источником выбросов парниковых газов. Большая часть общего объема выбросов парниковых газов в стране генерируется именно этим сектором. Необходимо отметить, что из этого объема около трети приходится на отрасли, связанные с производством тепловой и электрической энергии.

Такой высокий уровень выбросов парниковых газов в энергетическом секторе связан, в основном, с доминированием ископаемых видов топлива в энергетической матрице Республики Казахстан. Широкое использование угля, нефти и газа как основных источников энергии приводит к высоким уровням выбросов. Это является основной причиной необходимости пересмотра энергетической стратегии страны с акцентом на более экологичные источники энергии.

В целом, уголь играет ключевую роль в образовании выбросов парниковых газов в сфере поставок первичной энергии. Это связано как с высвобождением метана из угольных пластов на этапе добычи, так и с процессами, происходящими при сжигании угля, которые также влекут за собой значительные выбросы парниковых газов. В связи с этим, сокращение добычи угля, а также постепенный переход от его использования являются приоритетными задачами для стран, стремящихся к декарбонизации своей экономики. Для Республики Казахстан, который активно развивает свой энергетический сектор, это особенно актуально. Сокращение угля и переход к более экологически чистым источникам энергии будут ключевыми моментами в стратегии декарбонизации экономики страны.

Конечный спрос на энергию охватывает широкий спектр потребления энергии в различных секторах экономики. В этот спектр входит не только потребление электрической и тепловой энергии, но и прямое сжигание различных видов топлива. Промышленный сектор, транспорт, сельское хозяйство, а также дома и коммерческие здания включены в этот перечень. Эти области активно используют энергию для своей ежедневной работы.

Особое внимание стоит уделить высокой доле прямого сжигания топлива. Этот фактор указывает на то, что многие процессы, особенно в промышленности и транспорте, напрямую зависят от топлива, как источника энергии. В Республике Казахстан этот показатель особенно заметен. Страна, богатая ископаемыми ресурсами, интенсивно использует ископаемое топливо в своих энергетических потребностях, что характеризует конечный спрос на энергию в регионе.

Достижение углеродной нейтральности в Республике Казахстан к 2060 году является важной целью, которая предполагает глубокую трансформацию всей энергетической инфраструктуры страны. Этот процесс будет включать в себя три ключевых направления, которые обеспечат минимизацию выбросов углекислого газа и других парниковых газов:

1) Декарбонизация поставок первичной энергии: это означает переход от ископаемых видов топлива, таких как уголь и нефть, к более экологически чистым и устойчивым источникам.

2) Декарбонизация производства электрической и тепловой энергии: Целью этого направления является создание системы производства электроэнергии и тепла, которая была бы по большей части свободна от выбросов углерода.

3) Декарбонизация и высокоэффективное использование энергии в различных сферах, включая здания, транспорт и промышленные предприятия. Это включает в себя переход к энергоэффективным технологиям и повышение эффективности использования ресурсов.

Выбросы парниковых газов для всех сценариев энергетического сектора представлены на рисунке ниже.

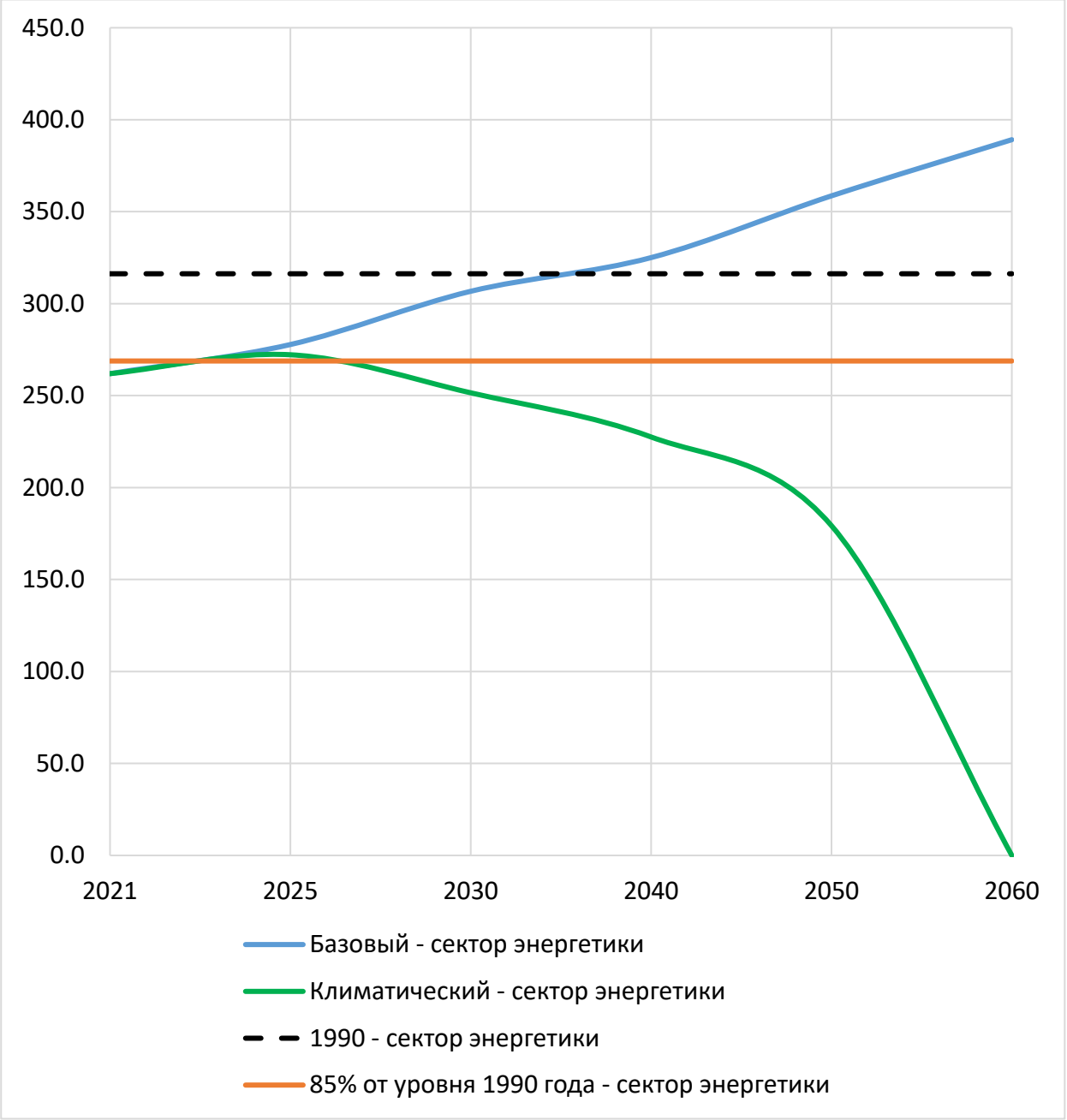


Рисунок 2.5.1. Сценарии развития выбросов парниковых газов от сектора энергетики, МтСО2экв

Самым значительным вкладом в сокращение выбросов парниковых газов в энергетическом секторе станет сдвиг к более устойчивым источникам энергии. Это будет происходить за счет уменьшения доли ископаемого топлива в энергетическом балансе, а также благодаря переходу к использованию электричества и тепла вместо прямого сжигания углеводородов. Кроме того, природный газ может играть ключевую роль в качестве "моста" во время переходного периода, пока интенсивно не развиваются альтернативные и возобновляемые источники энергии, такие как солнечная и ветровая энергетика.

Ниже представлена таблица с выбросами парниковых газов по сценариям.

Таблица 2.5.1. Сценарии развития выбросов парниковых газов от сектора энергетики, МтСО2экв

	Факт	Базовый				Климатический			
	2021	2030	2040	2050	2060	2030	2040	2050	2060
Производство электроэнергии	105.1	122.9	129.6	138	144.2	100.5	93.5	80	0
Производство теплоэнергии	13.4	14.6	15.1	16.4	17.1	12.8	8.6	5.2	0
Нефтепереработка	1.9	2.4	2.7	2.9	3.1	1.8	1.5	1.2	0
Промышленность	30.4	39.6	45.3	50.9	56.8	28.9	26.4	19.8	0
Транспорт	25.2	26.9	28	34.6	39.3	24.2	23.5	19.6	0
Сектор услуг	33.5	37.3	39.1	43.5	47.7	32.5	28.6	19.4	0
Население	6.5	8.2	8.4	8.7	10.1	6.3	5.9	4.7	0
Сельское хозяйство	3.1	3.3	3.4	4.2	4.4	2.9	2.2	1.8	0
Прочие сектора	2.3	2.9	3.1	3.4	3.5	2.2	1.9	1.7	0
Летучие - твердые виды	9.7	10.5	10.7	11.9	12.7	9.3	7.1	6.1	0
Летучие – нефтегаз	30.8	38.1	39.6	44.1	50.2	30.1	28.3	19.8	0
Всего	**261.9**	**306.7**	**325**	**358.6**	**389.1**	**251.5**	**227.5**	**179.3**	**0**

Источник: результаты модели TIMES Республики Казахстан

Примечание: охвачены выбросы парниковых газов по секторам сжигания энергетики и летучие выбросы парниковых газов

На основе анализа данных становится безусловно ясно, что без принятия дополнительных регулятивных мер и активных шагов в направлении сокращения выбросов, объем парниковых газов в секторе энергетики будет неуклонно расти в рамках базового прогнозного сценария. Эта растущая тенденция наблюдается на протяжении всего изученного временного периода. Для того чтобы предотвратить негативные экологические последствия, требуется немедленное вмешательство и пересмотр текущих стратегий в области экологической безопасности.

Декарбонизация энергетического сектора потребует крупных инвестиций, стимулирования значительных изменений в поведении конечных потребителей

энергии. Для декарбонизации электро- и теплоэнергетики необходимо введение рыночных цен на энергетические услуги, которое стимулирует внедрение энергосберегающих технологий и изменение поведения потребителей.

Декарбонизация в производстве, транспортировке и распределении электроэнергии и тепла будет достигнута за счет замены существующего изношенного оборудования и инфраструктуры в конце срока их экономической жизни на безуглеродное и низкоуглеродное оборудование.

Необходимо обеспечить устойчивое снижение доли угольной генерации. Этот процесс в связи с текущим высоким уровнем износа основных фондов в угольной энергетике будет происходить по мере истечения срока службы угольных электростанций с заменой выбывающих мощностей альтернативными и возобновляемыми источниками энергии.

В долгосрочной перспективе использование возобновляемых источников энергии будет сопровождаться системами сохранения электроэнергии, что позволит регулировать предложение электроэнергии и лучше интегрировать возобновляемые источники энергии в энергосистему.

Необходимо обеспечить повышение энергоэффективности во всех секторах, что позволит избежать чрезмерного потребления энергии. Такие улучшения должны включать улучшение теплоизоляции и использование современных энергоэффективных приборов в зданиях, переход на современные топливосберегающие транспортные средства и постепенную замену промышленного оборудования по истечении его срока службы на более энергоэффективные, а также применение иных технологий повышения энергоэффективности и энергосбережения.

Повышение энергоэффективности и переход на низкоуглеродные технологии во всех секторах экономики вызовут значительные изменения в поставках первичной энергии. Ниже даны результаты по общим поставкам первичной энергии по видам топлива. Виден переход к чистым видам источников энергии в климатическом сценарии.

Таблица 2.5.2. Общие поставки первичной энергии по видам топлива, тыс. тнэ

	Факт	**Базовый**				**Климатический**			
	2021	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**
Уголь	34174	37077	34003	27784	33735	24028	18522	6772	0
Нефтепродукты	17027	19253	20454	21059	21475	15778	14348	9275	1751
Природный газ	20256	19776	23348	27682	30200	18898	24395	20870	6446
Биотопливо	24	310	434	459	888	384	628	2818	4215
Атом	0	0	0	0	0	0	4127	8255	8255
Гидроэнергия	783	922	1565	1635	1129	1254	1254	1254	818

ВИЭ и альтернативные источники энергии (малые ГЭС, СЭС, ВЭС, геотермия)	278	242	822	1715	2197	2472	5045	18619	39559
Экспорт (-) / импорт (+) электроэнергии	-65	-682	-830	-978	-1956	-682	-830	-978	-1956
Экспорт (-) / импорт (+) нефтепродуктов	-5164	-3459	-4280	-3134	-3238	-3928	-5185	-7002	-2981
Всего	**67314**	**73438**	**75517**	**76220**	**84430**	**58204**	**62305**	**59882**	**56107**

Конечный спрос будет смещаться в сторону использования низкоуглеродных видов топлива, таких как биотопливо и водород, в тех областях, где переход на электричество все еще затруднен.

Снижение конечного спроса на энергию требует значительных преобразований в таких секторах, как транспорт, жилищно-коммунальное хозяйство (далее – ЖКХ) и промышленность.

Повышение энергоэффективности при достижении углеродной нейтральности, позволяющее избежать чрезмерного потребления энергии, будет значительным во всех секторах. Такие улучшения включают, например, улучшение теплоизоляции и использование современных энергоэффективных приборов в зданиях, переход на современные топливосберегающие транспортные средства и постепенную замену промышленного оборудования по истечении его срока службы на более новые, энергоэффективные технологии.

Сценарий декарбонизации потребует повсеместного отказа от ископаемых видов топлива и, таким образом, максимально возможного перехода конечного энергопотребления на электричество и тепло, а также на низкоуглеродные и безуглеродные виды топлива.

Если в настоящее время на электричество и тепло приходится около 30% энергопотребления, то в 2060 году по сценарию декарбонизации они будут покрывать более двух третей энергопотребления. Доля ископаемого топлива, напротив, снизится с нынешних 69% до 6%, в основном за счет постепенного отказа от угля и сокращения использования нефти и газа, несмотря на рост экономики.

Кроме того, конечный спрос будет смещаться в сторону использования низкоуглеродных видов топлива, таких как биотопливо и водород, в тех областях, где переход на электричество все еще затруднен.

Таблица 2.5.3. Конечный спрос на энергию по секторам и по видам топлива, тыс. тнэ

	Факт	**Базовый**				**Климатический**			
	2021	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**
Первичная энергия									
Уголь	9036	8794	8830	8887	9829	6673	5547	1369	0
Природный газ	6632	8537	9518	10321	10506	7914	7971	5795	0
Биотопливо	23	308	433	457	887	382	626	2351	3496
Солнце	0	0	0	0	0	0	0	341	1198
Геотермия	0	31	38	51	57	129	152	525	1071
Вторичная энергия									
Нефтепродукты	13111	14824	15750	16215	16536	11927	10826	7141	1348
Электроэнергия	7637	8931	10073	10788	11779	9494	13125	18081	31451
Теплоэнергия централизованная	5913	6450	8208	9050	10109	6616	7912	12179	16521
Водород	0	25	1426	2279	3794	131	929	4508	6683
Всего по типам энергии	**42351**	**47900**	**54275**	**58047**	**63495**	**43267**	**47087**	**52291**	**61768**
Сельское хозяйство	973	993	1050	1071	1109	1005	1142	1267	1435
Промышленность	13108	14714	17641	19448	22464	15601	19993	21310	22590
Здания	20243	22307	24561	26215	28546	18329	18456	22304	32010
Транспорт	8027	9886	11023	11313	11376	8332	7497	7410	5733
Всего по секторам	**42351**	**47900**	**54275**	**58047**	**63495**	**43267**	**47087**	**52291**	**61768**
Расходы на собственные нужды, потери при преобразовании, транспортировке и распределении энергоресурсов									

Пребразование энергии из первичной во вторичную форму	15349	14792	9171	6895	9082	6310	2237	-1390	-2795
Собственные нужды предприятий	5165	5859	6025	5432	5659	5255	8453	6613	2261
Потери по электрическим сетям	784	802	844	691	760	650	1024	1594	2117
Потери по тепловым сетям	3664	4084	5202	5155	5433	2722	3503	775	-7244
Всего по расходу энергии	**24962**	**25538**	**21242**	**18173**	**20935**	**14937**	**15217**	**7591**	**-5661**
Общий итог по конечному спросу и расходам энергии									
Итого	**67314**	**73438**	**75517**	**76220**	**84430**	**58204**	**62305**	**59882**	**56107**

Для достижения климатически желательных показателей, а именно снижения выбросов парниковых газов относительно уровня 1990 года, требуется принятие дополнительных мер по регулированию. В контексте исследования к этим дополнительным мерам можно отнести несколько ключевых пунктов.

Первоочередной является снижение зависимости от угля в процессе производства электроэнергии. Второй пункт — это активация атомных электростанций (АЭС) как альтернативного и более экологически чистого источника энергии. Это может стать дополнительным фактором, снижающим общий уровень выбросов. Третьим важным элементом является введение углеродного налога, особенно в отношении тех секторов, которые сейчас не подпадают под квотирование выбросов. Этот финансовый инструмент может стимулировать более ответственное отношение к снижению выбросов парниковых газов.

В совокупности эти меры могут значительно скорректировать текущую негативную картину и привести к снижению выбросов парниковых газов в секторе энергетики.

2.6. Производство электроэнергии

Сектор производства тепловой и электрической энергии, хотя и представляет собой относительно небольшую часть экономики с точки зрения добавленной стоимости, играет критически важную роль в экосистеме Республики Казахстан. Если оценивать его участие в экономической структуре страны, на долю этого сектора приходится чуть менее 2% общей добавленной стоимости и такой же процент занятости. Однако нельзя уменьшать его значение, так как он служит основой для нормального функционирования как экономической системы, так и социальной структуры Республики Казахстан.

Тем не менее, одним из основных недостатков этого сектора является его высокий уровень выбросов парниковых газов. Производство электроэнергии и тепла вносит значительный вклад в экологическое состояние страны. Согласно статистике, именно от этого сектора исходит около трети всех выбросов парниковых газов в энергетическом комплексе Республики Казахстан. Эти данные являются предметом серьезной обеспокоенности и требуют пристального внимания со стороны правительства и общества. В настоящее время сектор электро- и теплоэнергетики зависим от энергетического угля.

Значительный износ основных фондов в энергетической отрасли является одной из главных проблем, с которой сталкивается данная сфера. Этот износ приводит к тому, что уровень выбросов парниковых газов в атмосферу увеличивается, что может иметь негативные последствия для окружающей среды. Старые системы распределения, используемые как для передачи электроэнергии, так и для тепла, уже давно устарели. Эти устаревшие системы, находясь в плохом состоянии, приводят к очень высоким потерям при передаче и распределении энергии. Это означает, что большая часть произведенной энергии теряется и не доходит до конечного потребителя, что в свою очередь ведет к неэффективности работы всей энергетической системы.

Большинство электростанций в нашей стране, к сожалению, по-прежнему опираются на устаревшие технологические подходы. Стоит отметить, что около более половины всех установленных генерирующих мощностей в стране были эксплуатировались более 40 лет. Это свидетельствует о том, что многие из них уже функционировали дольше установленного проектного срока службы. Исходя из этого, представляется возможность замены устаревшего и высокоуглеродного оборудования на более современные технологии. В частности, можно рассмотреть газовые тепловые электростанции как промежуточное решение, а в долгосрочной перспективе стоит активно интегрировать альтернативные и возобновляемые источники энергии в энергетическую систему страны.

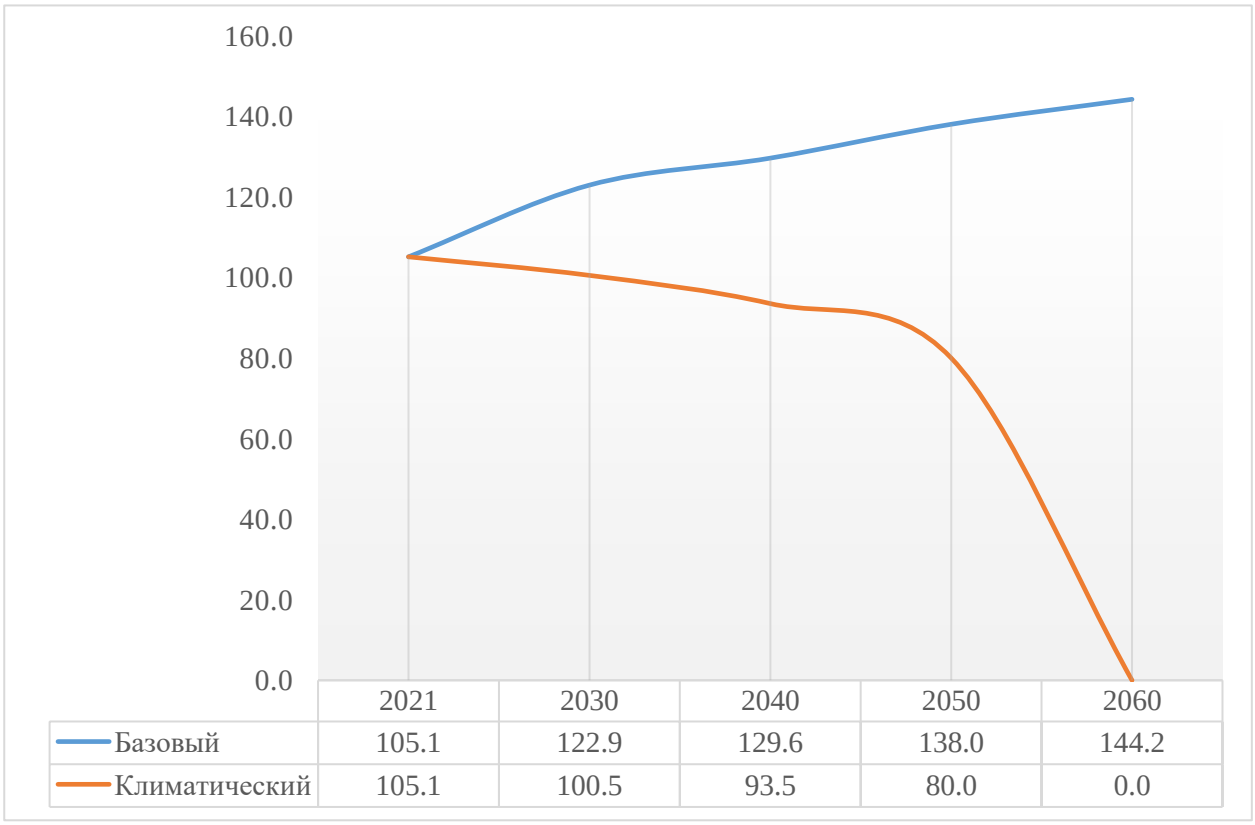
Однако несмотря на наличие возможности для замены, есть риск, что станции будут продолжать работать на устаревших технологиях. Такое положение дел может привести к тому, что страна либо не сможет достичь поставленных целей по сокращению уровня выбросов, либо столкнется с необходимостью вкладывать дополнительные средства в модернизацию существующего оборудования. В итоге это может привести к досрочному списанию дорогостоящего высокоуглеродного

оборудования и превращению его в так называемые "безнадежные активы", что несомненно нанесет ущерб экономике страны.

В Республике Казахстан на текущий момент сложилась ситуация, при которой инвестиции в распределительные электросети и развитие альтернативных источников генерации электроэнергии и тепла ещё не представляются экономически выгодными. Одной из причин такой экономической модели являются решения, в результате которых были установлены относительно низкие потребительские тарифы на такие ресурсы как электричество, тепловую энергию и ископаемое топливо. Это создает преграды для модернизации существующих электросетей и ставит под вопрос экономическую целесообразность перехода к более экологичным и устойчивым источникам энергии.

С учётом мировых трендов и необходимости движения в направлении декарбонизации электро- и теплоэнергетики, для Республики Казахстан актуальным становится вопрос о переходе к рыночному ценообразованию в секторе энергетики. Такое решение может стать катализатором для внедрения инновационных энергосберегающих технологий, что, в свою очередь, способствует изменению поведенческих моделей потребителей и увеличивает интерес к использованию более чистых источников энергии.

В производстве тепло- и электроэнергии выбросы парниковых газов по сценариям представлены ниже.



	2021	2030	2040	2050	2060
Базовый	105.1	122.9	129.6	138.0	144.2
Климатический	105.1	100.5	93.5	80.0	0.0

Рисунок 2.6.1. Выбросы парниковых газов от сектора производства электроэнергии, MmCO2экв

Ниже представлена информация по выработке электроэнергии.

*Таблица 2.6.1. Выработка электроэнергии, млдр квт*ч*

	Факт	**Базовый**				**Климатический**			
	2021	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**
Угольные ТЭС и ТЭЦ	78.7	77.2	94.5	101.7	93.9	56.2	30.5	15.1	0
Газовые ТЭС и ТЭЦ	20.6	36	60.7	87.4	112.7	36.5	63.3	78.5	0
Гидроэнергия - ГЭС большие	10.6	9	9	8.5	7.1	10.3	10.3	10.3	8
Гидроэнергия - ГЭС малые	0.6	1.5	1.7	2	2.5	1.6	2.3	3.7	4.9
Атомная энергия	0	0	0	0	0	0	32.3	40.3	80.2
Солнечная энергия	0.8	7.2	7.3	8	8.7	10.2	22.3	31.5	120.3
Ветровая энергия	3.1	12	13	15	18	14.1	30.2	44.2	170.8
Биоэнергия	0	1	1.2	1.4	1.6	2.3	3.6	4.2	8.3
Водородная энергия	0	0	0	0	0	3.2	13.4	40.2	60
Всего	**114.4**	**143.9**	**187.4**	**224**	**244.5**	**134.4**	**208.1**	**268.1**	**452.5**

Источник: результаты модели TIMES Республики Казахстан

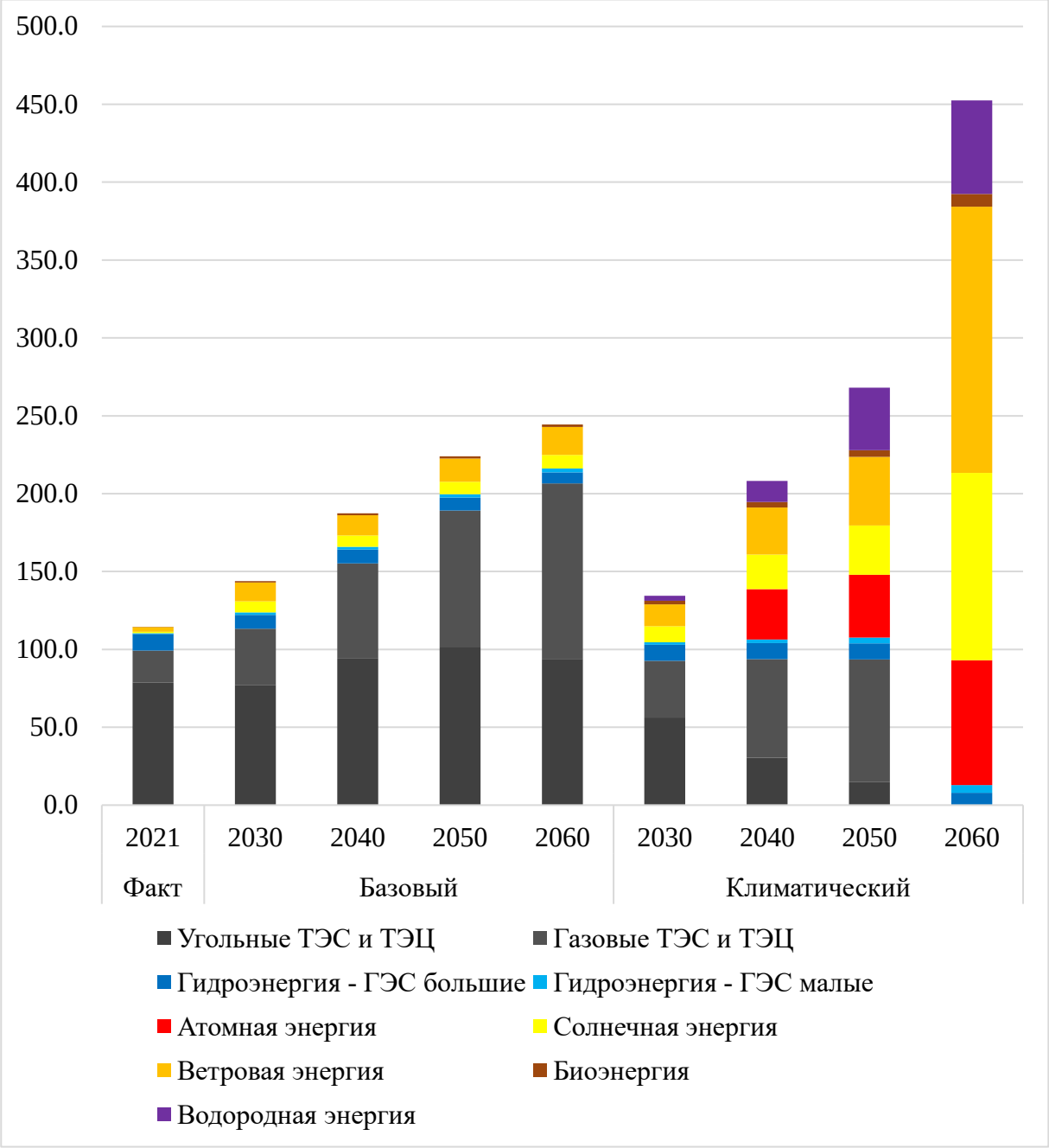


*Рисунок 2.6.2. Выработка электроэнергии, млдр квт*ч*

В рассматриваемых прогнозных вариантах производства электричества, наблюдается явная тенденция к его увеличению. Каждый из этих вариантов предполагает определенный темп роста производства энергии в будущем.

В базовом сценарии прогнозирования, когда мы смотрим на 2030 год, предполагается, что выработка электричества возрастет примерно на 15% по сравнению с сегодняшним днем. Если же рассматривать более долгосрочный период до 2060 года, то ожидается, что это значение удвоится, демонстрируя значительный рост энергопроизводства.

В контрасте с базовым сценарием, другой вариант, который центрируется вокруг идеи декарбонизации энергосектора, предполагает несколько иной путь развития. По этому сценарию, к 2030 году производство электричества увеличится

на 10%. Это меньше, чем в базовом варианте, но к 2060 году ожидается, что объем производства электроэнергии увеличится в четыре раза относительно нынешнего уровня.

Таким образом, разные сценарии предоставляют разное видение будущего энергетического сектора, но оба подчеркивают важность планирования и адаптации к меняющимся условиям и потребностям. Что касается составляющих энергетического баланса, во всех сценариях отмечается сокращение доли угля в структуре выработки электроэнергии. В то же время, происходит увеличение производства электричества на природном газе, а также на гидро-, солнечной и ветровой энергии. Это особенно заметно в базовом сценарии, где темпы роста выработки на природном газе значительно превышают аналогичные показатели для угля.

В сценарии декарбонизации большое внимание уделяется не только использованию традиционных источников энергии, но и перспективным и инновационным. Когда говорят о декарбонизации, часто предполагают исключение или минимизацию углеродного следа. В этом контексте особое внимание уделяется атомным электростанциям. Эти станции способны вырабатывать огромное количество электроэнергии без выбросов CO2, делая их ключевым элементом в сценариях низкоуглеродного развития.

Кроме того, в сценарии также рассматривается потенциал водородной энергии. Водород, будучи экологически чистым топливом, может стать настоящей революцией в энергетике, предоставляя возможность для создания полностью устойчивой и зеленой энергетической системы.

С учетом всего вышесказанного, структура выработки электроэнергии в рассматриваемом сценарии будет значительно меняться. Уголь, как один из основных источников загрязнения атмосферы, будет уступать свои позиции в пользу атомной и водородной энергии, а также других экологически чистых источников. Этот переход не только поможет в борьбе с изменением климата, но и создаст основу для устойчивого развития в будущем.

В целом, анализ различных сценариев показывает, что независимо от выбранной стратегии, доля угля в энергетическом балансе сокращается. Однако, степень этого сокращения и замены угля другими источниками энергии значительно зависят от конкретных подходов к развитию энергетического сектора. В базовом сценарии рост, в основном, обусловлен увеличением использования природного газа, в то время как в сценарии декарбонизации акцент делается на широкомасштабном внедрении возобновляемых и экологически чистых источников энергии.

Созданные условия для стимулирования развития возобновляяемых источников энергии прежде всего акцентированы на поддержку крупномасштабного производства электроэнергии, получаемой из возобновляемых источников энергии. Это основной фокус государственной стратегии в данной сфере. Однако, механизмы, предназначенные для поддержки маломасштабного производства электроэнергии из возобновляяемых источников энергии, на практике не всегда работают так, как ожидалось. Прямая финансовая поддержка

направлена в основном на автономные возобновляемые установки с ограничением мощности до 5 кВт. Государство предоставляет субсидии, покрывающие до 50% инвестиционных затрат проекта. Однако важное условие для получения такой поддержки – оборудование должно быть произведено на территории Республики Казахстан. Данная мера финансирования реализуется через бюджеты местных исполнительных органов.

Таким образом, несмотря на наличие некоторых мер поддержки для маломасштабного производства, есть определенные нюансы, которые могут усложнить реализацию проектов в этой сфере.

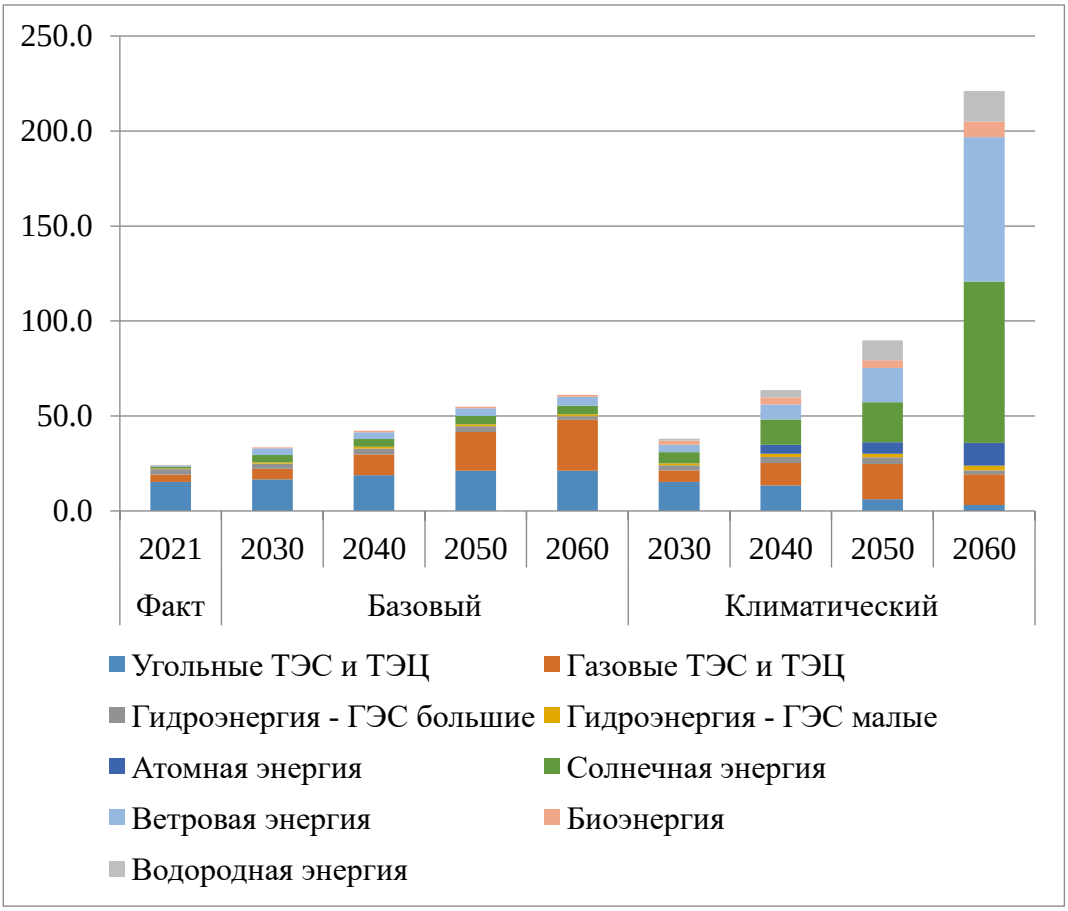


Рисунок 2.6.3. Установленные мощности электростанций, ГВт

Таблица 2.6.2. Установленные мощности электростанций, ГВт

	Факт	**Базовый**				**Климатический**			
	2021	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**
Угольные ТЭС и ТЭЦ	15.2	16.6	18.8	21.1	21.1	15.2	13.4	6.2	3.2
Газовые ТЭС и ТЭЦ	4	5.6	11	20.4	26.9	6.2	11.8	18.5	16.2

Гидроэнергия - ГЭС большие	2.8	2.6	3.1	3.1	1.7	2.6	3.3	3.5	2
Гидроэнергия - ГЭС малые	0.3	0.7	0.9	1	1.1	1	1.6	1.9	2.4
Атомная энергия	0	0	0	0	0	0	4.8	6	12
Солнечная энергия	1	4	4.1	4.3	4.6	6	13.2	21.1	85
Ветровая энергия	0.7	3.5	3.6	4	4.6	3.8	8	18	76
Биоэнергия	0	0.5	0.8	0.9	1	2.3	3.6	4.2	8.3
Водородная энергия	0	0	0	0	0	1	4	10.3	16
Всего	24	33.5	42.3	54.9	61.1	38.1	63.7	89.7	221.1

Источник: результаты модели TIMES Республики Казахстан

Для достижения поставленной цели полной декарбонизации в секторе производства электроэнергии важно не только просто принять ряд мер, но и создать глубоко проработанное, многофакторное видение. Это видение должно охватывать множество аспектов, связанных с данным сектором, чтобы гарантировать долгосрочный успех и устойчивость. Погрузимся в разбор ключевых шагов и мер, которые следует предпринять для реализации такого всестороннего подхода.

В первую очередь, критического значения приобретает разработка стратегического понимания атомной энергетики. Это не просто оценка текущего состояния дел, но и глубокое понимание потенциала, а также ассоциируемых с ней рисков. Определив место атомной энергии в будущей безуглеродной системе, можно гарантировать ее эффективное использование.

Необходимо активно взаимодействовать с населением и осуществлять разъяснительную работу в контексте предстоящего референдума относительно атомной энергетики. Это особенно важно, поскольку многие граждане могут не обладать достаточной информацией или иметь ошибочные представления о данной теме. Для этого следует основываться на прочной научной базе, которая исследует и подтверждает потенциал атомной энергетики.

Важно подчеркнуть, что при оценке экономической выгоды от атомной энергетики нельзя рассматривать только прямые капитальные стоимости. Необходимо учитывать и дополнительные косвенные преимущества, которые проистекают из развития связанных отраслей. Так, благодаря активному развитию атомной энергетики, может произойти стимулирование создания новых экономически активных рабочих мест в смежных отраслях.

Более того, не стоит забывать о таком важном факторе, как стабильность поставок электроэнергии в экономику страны. Некоторые эксперты могут упускать из виду или недооценивать этот аспект. Однако, гарантированное и стабильное

энергоснабжение – это ключевой элемент энергобезопасности, который, безусловно, имеет свою стоимость. Это может служить дополнительным аргументом в пользу развития атомной энергетики.

Для устойчивости сектора необходимо пересмотреть текущую систему тарифообразования. Отказ от искусственных ограничений и сдерживания тарифов на электроэнергию в пользу более прозрачной системы будет стимулировать инвестиции в новые технологии и гарантировать экономическую устойчивость для производителей.

Основной фокус также должен быть направлен на структурирование рынка. Рынок, который отражает реальные экономические показатели и цены, способствует инновациям, устойчивости и повышению конкурентоспособности.

Развитие и модернизация Национальной электрической сети, а также интеграция сетевых станций накопления энергии, станут залогом успешной интеграции различных источников электроэнергии. Это, в свою очередь, обеспечит стабильность всей энергосистемы.

Маневренные источники генерации, такие как газовые и гибридные станции, играют ключевую роль в обеспечении гибкости системы, позволяя быстро реагировать на изменения в спросе и предложении.

Для оптимизации работы системы важно также сосредоточиться на снижении потерь энергии при ее производстве и передаче. Это приведет к повышению общей эффективности и сокращению операционных издержек.

Стратегический план по постепенному выводу из эксплуатации устаревших угольных мощностей, а также внедрение технологий улавливания и хранения углерода, позволит двигаться в направлении "зеленых" альтернатив.

Также необходимо добиться согласования всех нормативов, касающихся загрязнения воздуха и сокращения выбросов парниковых газов. Создание единой и эффективной стратегии в этом направлении поможет достичь глобальных целей.

Маломасштабные ветровые, солнечные и другие возобновляемые источники энергии являются ключевыми элементами в переходе к декарбонизации. Их развитие и интеграция в систему необходимы для диверсификации источников и уменьшения зависимости от угля.

И, наконец, долгосрочная стратегия по развитию гидроэнергетики, а также газификации существующих угольных мощностей должны стать частью комплексного подхода к устойчивому развитию электроэнергетического сектора.

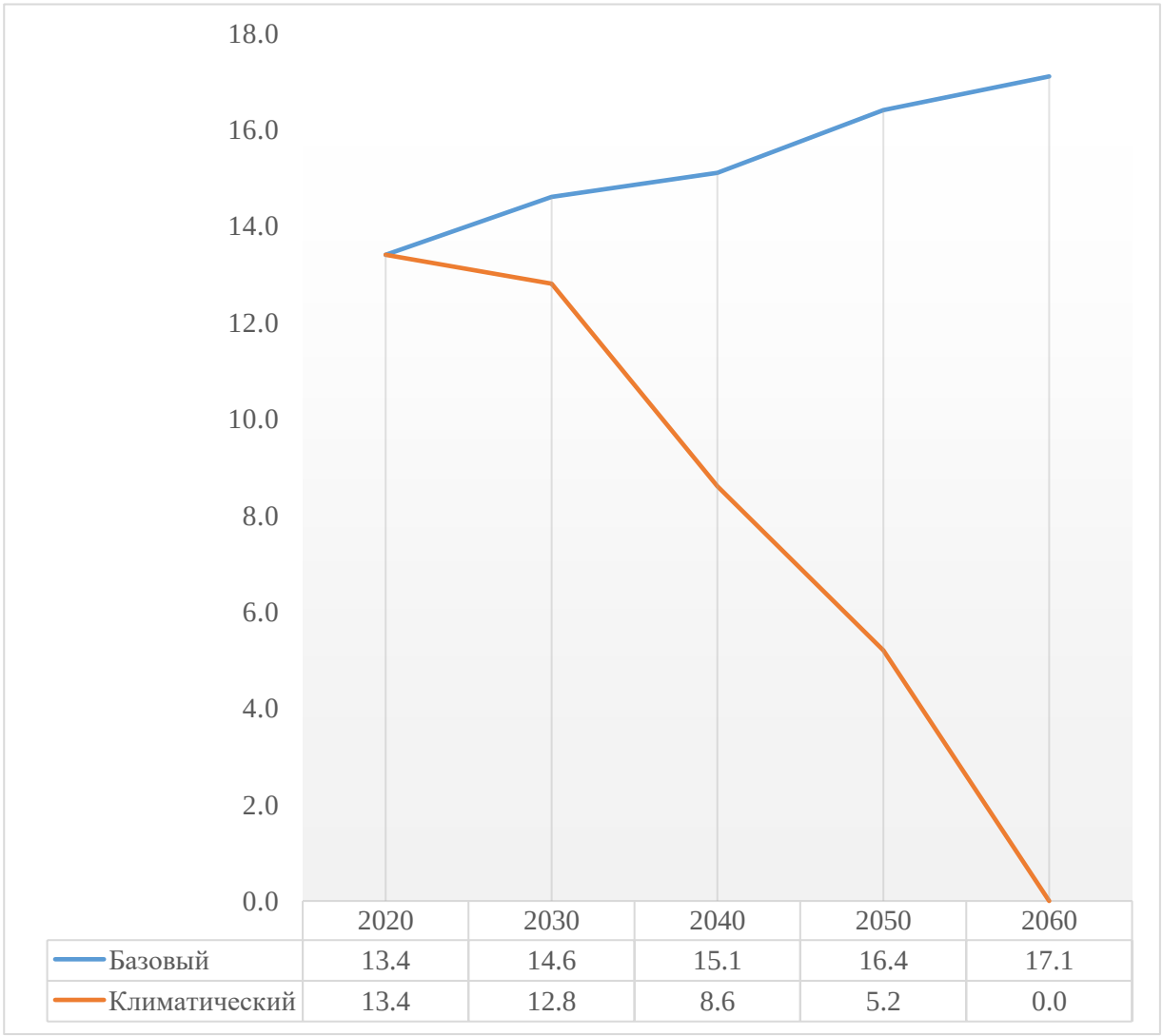
2.7. Производство теплоэнергии

Сектор теплоснабжения в Республике Казахстан играет ключевую роль из-за особенностей климата, характерного для большинства регионов страны. Из-за продолжительных и суровых зим, обеспечение населения и предприятий теплом стоит на переднем плане. Уголь, который традиционно используется для отопления, вызывает большие выбросы парниковых газов. Поэтому одним из наиболее перспективных и экологически чистых способов решения проблемы

является электрификация данного сектора, что позволит сократить зависимость от угля.

В области производства тепловой энергии наибольший вклад в выбросы в атмосферу делают установки, такие как котельные. Это связано с их высокой долей в структуре генерации тепловой энергии. Однако стоит отметить, что выбросы от теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) уже принимаются во внимание при учете в секторе производства электрической энергии, и не дублируются в учете для тепловой энергии. При разработке различных сценариев, целью которых является декарбонизация производства теплоэнергии, наблюдается явное снижение уровня выбросов. Этот положительный тренд связан с ростом доли ТЭЦ в общем объеме теплоснабжения, так как их эксплуатация признается более экологически устойчивой и безопасной для окружающей среды. Развитие такого направления помогает не только уменьшить вредное воздействие на природу, но и делает процесс производства тепловой энергии более эффективным и устойчивым.

В секторе производства тепловой энергии основными источниками выбросов являются котельные установки. Стоит отметить, что выбросы от теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) были учтены в другой категории, а именно в секторе производства электроэнергии. Это разделение важно для понимания динамики и структуры выбросов в разных подсекторах энергетики.



	2020	2030	2040	2050	2060
Базовый	13.4	14.6	15.1	16.4	17.1
Климатический	13.4	12.8	8.6	5.2	0.0

Рисунок 2.7.1. Сценарии развития выбросов парниковых газов в секторе производства теплоэнергии, МтСО2экв

Следует отметить, что, когда речь идет о декарбонизационной стратегии, наблюдается значительное уменьшение уровня выбросов в атмосферу. Это во многом связано с тем, что происходит большой переход на использование теплоэлектроцентралей как основных источников тепловой энергии. Такие установки часто работают на более экологически чистых видах топлива или используют более современные методы очистки выбросов, что делает их предпочтительным выбором в контексте устойчивого развития.

В секторе производства тепловой энергии важную роль играют котельные, особенно если рассматривать их влияние на экологию. Однако, с учетом стремления к снижению уровня выбросов и переходу на более устойчивые источники энергии. Это подтверждается сценариями, ориентированными на декарбонизацию, где наблюдается существенное сокращение выбросов за счет перехода на теплоснабжение от этих источников.

Производство централизованной тепловой энергии декарбонизируется за счет ухода от угля к природному газу, эффективному использованию нефтепродуктов и возобновляемой энергии в виде геотермальной энергии (тепловые насосы) и биотоплива. Как видно из рисунка, производство централизованной тепловой энергии в климатическом сценарии к 2060 году происходит за счет использования тепловых насосов. Ниже представлена информация в общем по теплоснабжению с учетом централизованного и индивидуального источников.

Таблица 2.7.1. Производство тепловой энергии по видам топлива, тыс. тнэ

	Факт	**Базовый**				**Климатический**			
	2021	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**
Центральное отопление и ГВС- производство									
Угольные ТЭЦ и котельные	5042	5546	6971	7291	8818	4469	3125	2156	0
Газовые ТЭЦ и котельные	4535	4989	6439	6914	6724	4158	5562	4751	0
Нефтепродукты	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Биотопливо	0	0	0	0	0	206	206	307	784
Тепловые насосы (геотермия)	0	0	0	0	0	506	2521	5740	8493
Всего	**9577**	**10534**	**13409**	**14205**	**15542**	**9339**	**11414**	**12954**	**9277**

Спрос на Центральное отопление и ГВС по секторам									
Селькое хозяйство	83	91	80	72	62	92	92	92	90
Промышленость	297	326	547	600	670	268	260	477	236
Здания	3926	4319	6305	6977	7814	5253	5683	5946	5886
Потери	5750	6325	6477	6556	6996	3725	5379	6439	3065
Всего	**10055**	**11061**	**13409**	**14205**	**15542**	**9339**	**11414**	**12954**	**9277**
Спрос на Индивидуальное отопление и ГВС									
Уголь	4746	4860	5045	5156	5236	4069	3265	985	0
Природный газ	4997	5428	7192	7320	6138	4607	4837	1191	0
Нефтепродукты	3226	3380	3533	3687	3841	2151	1536	615	0
Биотопливо	53	59	78	257	688	88	159	485	1031
Тепловые насосы (геотермия)	6	6	8	15	32	97	107	459	989
Гелиоколлекторы	0	0	0	0	0	0	0	341	1198
Электроэнергия	90	449	655	985	1082	168	486	1452	1151
Всего	**13118**	**14182**	**16511**	**17420**	**17016**	**11181**	**10390**	**5528**	**4369**
Общее производство тепловой энергии и горячего водоснабжения для зданий									
Всего	**17044**	**18501**	**22816**	**24397**	**24831**	**16433**	**16074**	**11474**	**10255**
Общее производство тепловой энергии и горячего водоснабжения									
Всего	**22694**	**24716**	**29921**	**31625**	**32558**	**20519**	**21804**	**18482**	**13646**

Как видно из результатов, в климатическом сценарии, конечный спрос по различным видам энергии снижается в общем, что говорит об увеличении эффективности используемых новых технологий отопления.

В условиях роста глобальных климатических вызовов и усиления мер по сокращению выбросов углекислого газа, декарбонизация теплоснабжения становится одной из ключевых задач. Электрофикация теплоснабжения — это один из способов реализации этой цели, представляющий собой процесс замены источников тепла, работающих на ископаемом топливе, на электрические системы. Это может включать в себя использование тепловых насосов, электрических котлов и других инновационных технологий.

Одним из главных преимуществ электрофикации является снижение выбросов углекислого газа. Электрические системы, особенно если они работают на возобновляемой энергии, существенно сокращают выбросы парниковых газов в атмосферу. Кроме того, современные тепловые насосы и другие электрические системы отличаются высокой эффективностью, что позволяет сократить затраты

на теплоснабжение. Эти системы также легко интегрируются с солнечными панелями, ветрогенераторами и другими источниками чистой энергии, обеспечивая гибкость и масштабируемость. Электрические системы, в отличие от систем на ископаемом топливе, не подвержены риску взрывов и утечек, что повышает безопасность.

Декарбонизация теплоснабжения через электрификацию представляет собой перспективное направление для создания устойчивой, безопасной и экономически эффективной энергетической инфраструктуры. Вложения в эту сферу сегодня могут принести ощутимые экологические, экономические и социальные выгоды в будущем. В условиях глобальных экологических вызовов такой подход становится не просто возможностью, но и неотъемлемой необходимостью для обеспечения устойчивого развития.

Декарбонизация сектора производства теплоэнергии стоит в центре из-за необходимости перехода к экологически чистым источникам энергии. Для достижения существенных результатов в этом направлении рекомендуется реализация ряда ключевых мер.

Во-первых, необходим отказ от искусственного сдерживания тарифов на тепловую энергию, так как это поможет стимулировать разработку и применение более эффективных и экологически чистых технологий. Важно также обеспечить прозрачность тарифообразования, чтобы повысить доверие потребителей и участников рынка. Снижение потерь при выработке и передаче тепловой энергии через оптимизацию систем теплоснабжения позволит сократить потери и увеличить эффективность.

Стоит также обратить внимание на разработку видения развития геотермальной энергии, поскольку этот источник энергии имеет огромный потенциал и может стать ключевым в декарбонизации. Поддержка развития горячего водоснабжения на основе солнечной энергии представляет собой дополнительный способ снижения углеродного следа. Не менее важным является планирование поэтапного вывода угольных теплогенерирующих мощностей из эксплуатации, так как уголь является одним из главных источников выбросов CO2.

Далее, стоит стимулировать развитие маломасштабных теплогенерирующих возобновляемых источников энергии, особенно в отдаленных или малонаселенных районах. Газификация существующих угольных мощностей также может быть перспективной, поскольку газ менее вреден для окружающей среды, чем уголь. И, наконец, развитие «умной» теплоэнергетики позволит более эффективно управлять потреблением и производством тепла, оптимизируя системы и снижая потери.

В долгосрочной перспективе, при учете глобальных климатических изменений и возрастающего дефицита ресурсов, декарбонизация теплоэнергетического сектора может стать ключевым элементом для обеспечения устойчивого развития. Например, интеграция тепловой энергетики с другими отраслями, такими как транспорт или промышленность, может привести к созданию синергетических эффектов и дополнительному снижению выбросов.

Также стоит учесть развитие новых технологий, таких как термоядерный синтез, который, при успешной коммерческой реализации, может предоставить

практически неограниченный источник чистой энергии. Дополнительно, с учетом быстро растущих цифровых технологий, большие данные и искусственный интеллект могут быть использованы для оптимизации систем теплоснабжения, предсказания потребления и проактивного управления ресурсами.

Цифровизация сектора теплоснабжения привлекает к интеграции современных технологий и цифровых решений в систему теплоснабжения. Это направлено на повышение его эффективности, надежности и адаптивности. Основное преимущество заключается в системах управления и мониторинга в реальном времени. С использованием сенсоров можно мгновенно отслеживать состояние оборудования и реагировать на изменения в потреблении. Кроме того, применение алгоритмов искусственного интеллекта и больших данных обеспечивает возможность прогнозирования и оптимизации потребления тепла.

Интеграция теплоснабжения с системами умного дома позволяет автоматически регулировать температуру и потребление, учитывая предпочтения пользователей и текущие условия. Этот подход согласуется с децентрализованными системами, где цифровые решения способствуют более эффективному управлению источниками тепла.

Концепция виртуальных тепловых сетей открывает возможности для обмена энергией между различными источниками, особенно в пиковые периоды. Параллельно, благодаря цифровым платформам и мобильным приложениям, потребители могут в реальном времени следить за своим потреблением, узнавать о тарифах и состоянии системы, что делает взаимодействие с поставщиками услуг более прозрачным и удобным.

И наконец, безопасность. Современные цифровые технологии помогают обеспечивать безопасность систем теплоснабжения, минимизируя риски аварий и защищая от несанкционированного доступа.

Важность внедрения программ образования и повышения осведомленности об энергетической устойчивости среди граждан не может быть недооценена. Информированные и просвещенные потребители становятся активными участниками в процессе декарбонизации, выбирая более эффективные и экологически чистые решения для своих потребностей в теплоснабжении.

2.8. Сектор промышленности

Рост экономической активности тесно связан с увеличением парниковых газов в атмосферу. Это особенно заметно в промышленном секторе, где интенсивное производство и использование ресурсов часто ведут к значительному увеличению эмиссий. Однако, в последние годы, благодаря активным исследованиям и разработке новых подходов, в рамках сценария декарбонизации экономики появилась возможность перехода к более экологичным технологиям. Это способствовало тенденции к снижению уровня эмиссий парниковых газов в атмосферу.

Один из ключевых моментов в этом процессе — это применение инновационных технологий в промышленности. Одним из таких направлений

является использование водорода в процессе производства стали. В классических методах производства стали основными компонентами являются углеродное топливо и кокс, которые при сжигании генерируют огромное количество углекислого газа.

Однако современные технологические подходы, такие как восстановление железной руды при помощи водорода, позволяют изменить этот процесс. В этой методике, железная руда восстанавливается водородом, превращаясь в так называемое "губчатое" железо. Этот материал далее обрабатывается в электродуговой печи, где электроды создают электрический ток, плавя губчатое железо и превращая его в сталь. Так как в этом методе отсутствует сжигание углеродсодержащих материалов, выбросы углекислого газа сокращаются в разы.

Можно сказать, что внедрение таких технологий в промышленность способствует одновременному экономическому росту и снижению экологического ущерба. Это означает, что происходит движение в правильном направлении в плане борьбы с глобальным изменением климата и защиты окружающей среды.

Снижение выбросов парниковых газов в энергоемких отраслях промышленности представляет собой многогранную и сложную задачу:

Большое количество производственных предприятий опирается на высокотемпературные технологические процессы. В этом контексте выработка тепла может занимать огромную долю общего потребления энергии. На сегодняшний день «зеленые» или экологически устойчивые технологии для получения высокотемпературного тепла еще не всегда представлены на рынке или доступны для массового внедрения.

Многие производственные комплексы представляют собой набор высокоинтегрированных и взаимосвязанных процессов. Изменение даже одного из этих процессов может потребовать глобального пересмотра и перепроектирования всего технологического цикла.

Учитывая продолжительный жизненный цикл многого промышленного оборудования, нежелание или невозможность замены его на современные модели может привести к сохранению старых и менее эффективных систем или же риску потерять инвестиции в будущем.

Модернизация устаревшего оборудования и переход на более современные и экологически чистые технологии потребуют значительных капиталовложений и финансовых ресурсов.

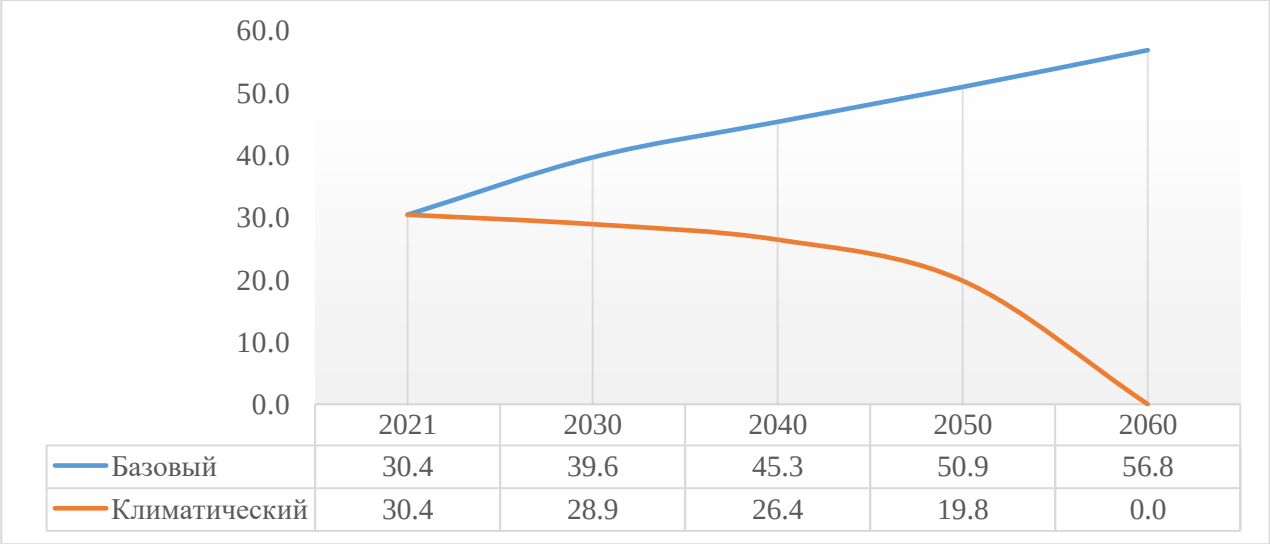
Наконец, инвестирование в новые, инновационные и экологически чистые технологические решения сталкивается с проблемой региональной конкуренции. Производители в соседних странах, где экологические стандарты могут быть менее строгими, имеют конкурентное преимущество.

К тому же, экономическое положение Республики Казахстан во многом зависит от экспорта сырьевых товаров. Это делает его уязвимым перед колебаниями мировых рыночных цен. Климатическая политика, особенно политика Европейского Союза, может негативно повлиять на экспорт углеродоемких товаров из Республики Казахстан. С учетом стремления ЕС и других стран к углеродной нейтральности к 2050 году, спрос на ископаемое

топливо неизбежно уменьшится. Добавим к этому введение механизмов пограничной углеродной корректировки (CBAM), направленных на налогообложение товаров с высоким уровнем выбросов, и получим сложную экономическую картину для экспортеров из Республики Казахстан.

Выбросы парниковых газов в промышленности и строительства представлены ниже.

Как видно, из рисунка, выбросы по сектору промышленности и строительства растет, так как это связано с ростом экономики.



	2021	2030	2040	2050	2060
Базовый	30.4	39.6	45.3	50.9	56.8
Климатический	30.4	28.9	26.4	19.8	0.0

Рисунок 2.8.1. Сценарии развития выбросов парниковых газов в секторе промышленности, MтCO2экв

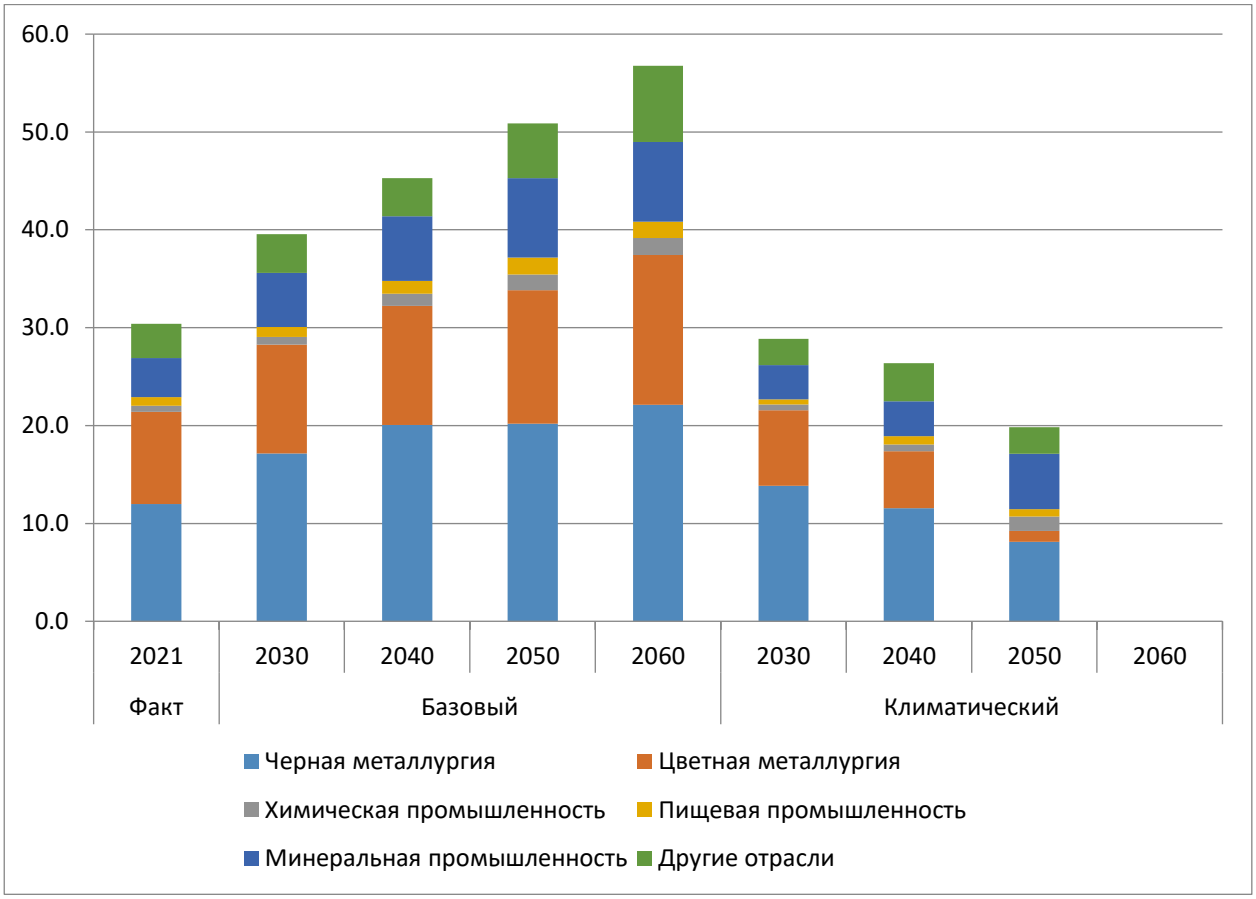


Рисунок 2.8.2. Сценарии развития выбросов парниковых газов в секторе промышленности по отраслям, МтCO2экв

Таблица 2.8.1. Выбросы парниковых газов от сжигания топлива в промышленности по отраслям, Мт CO2-экв.

	Факт	**Базовый**				**Климатический**			
	2021	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**
Черная металлургия	12	17.2	20.1	20.2	22.1	13.9	11.6	8.1	0
Цветная металлургия	9.4	11.1	12.1	13.6	15.3	7.7	5.8	1.1	0
Химическая промышленность	0.6	0.8	1.3	1.6	1.8	0.6	0.7	1.5	0
Пищевая промышленность	0.9	1	1.3	1.8	1.7	0.5	0.8	0.7	0

Минеральная промышленность	4	5.5	6.6	8.1	8.1	3.5	3.6	5.7	0
Другие отрасли	3.5	4	3.9	5.6	7.8	2.7	3.9	2.7	0
Валовые выбросы парниковых газов	**30.4**	**39.6**	**45.3**	**50.9**	**56.8**	**28.9**	**26.4**	**19.8**	**0**

Видно, что в климатическом сценарии происходит снижение выбросов парниковых газов по сравнению с базовым сценарием. Для понимания динамики также предоставляется конечный спрос по потреблению энергоресурсов в промышленности. Сильное сокращение выбросов парниковых газов достигается за счет повышения энергоэффективности в промышленности, особенно за счет изменений в структуре энергопотребления.

Таблица 2.8.2. Конечный спрос на энергию в промышленности по видам топлива и отраслям, тыс. тнэ

	Факт	**Базовый**				**Климатический**			
	2021	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**
Уголь	4409	3803	3632	3462	4178	3490	3287	465	0
Нефтепродукты	2084	1521	1282	1351	1462	1537	2788	1390	0
Природный газ	1503	2657	3198	3652	3540	3979	4712	3925	0
Электричество	3959	5235	5983	6502	7058	5261	6939	8093	14253
Теплоэнергия централизованная	296	377	547	600	670	274	265	486	241
Теплоэнергия промышленная	857	881	1276	1401	1563	639	619	1135	562
Биотопливо	0	216	297	200	199	290	489	1445	1805
Водород	0	25	1426	2279	3794	131	893	4371	5729
Всего	**13108**	**14714**	**17641**	**19448**	**22464**	**15601**	**19993**	**21310**	**22590**
Черная металлургия	3950	4579	5753	5560	6084	5855	7595	7856	8066

Цветная металлургия	3297	3341	3571	3744	4122	3397	3766	4256	4451
Химическая промышленность	1023	1154	1546	1681	1822	1058	1095	1383	1432
Пищевая промышленность	586	984	1326	1523	1623	789	1101	1340	1394
Минеральная промышленность	1256	1567	1678	1839	1858	1407	1938	1734	1633
Другие отрасли	2996	3090	3767	5101	6955	3095	4498	4741	5614
Всего	**13108**	**14714**	**17641**	**19448**	**22464**	**15601**	**19993**	**21310**	**22590**

Снижение выбросов парниковых газов связано это с вводом в состав промышленности мощности по производству стали с использованием водорода. В предложенной технологии, железная руда восстанавливается водородом в твердом состоянии, с получением железа прямого восстановления, называемого губчатым железом. Затем губчатое железо подается в электродуговую печь (ЭДП), где электроды генерируют ток для плавления губчатого железа с получением стали.

Как можно заметить из представленного графического материала, наблюдается рост выбросов в секторе промышленности. Это явление напрямую коррелирует с активным ростом экономики страны. С одной стороны, это положительная тенденция, свидетельствующая о развитии промышленного сектора. Но, с другой стороны, увеличение выбросов может негативно сказаться на экологической ситуации в регионе.

Тем не менее, из того же рисунка можно увидеть, что в определенном климатическом сценарии прогнозируется снижение выбросов парниковых газов по сравнению с базовым сценарием. Эта тенденция объясняется внедрением инновационных технологий в промышленный сектор. Одной из ключевых инноваций является использование водорода в процессе производства стали.

В рамках этой передовой технологии, железная руда подвергается процессу восстановления при помощи водорода в твердой фазе. В результате такого процесса образуется продукт, известный как губчатое железо. Это губчатое железо далее поступает в электродуговую печь (ЭДП), где при помощи электродов генерируется необходимый ток для плавления губчатого железа. Финальным продуктом этого сложного, но экологически чистого процесса является сталь высокого качества.

Кроме того, стоит отметить заметное снижение выбросов в секторе производства цветных металлов. В рамках стратегии декарбонизации, многие предприятия этой отрасли активно интегрируют передовые технологии и решения, направленные на уменьшение выбросов парниковых газов.

Особое внимание в секторе цветных металлов уделяется переходу на альтернативные источники энергии, оптимизации производственных процессов и повышению эффективности использования ресурсов. Например, внедрение новых сплавов и материалов, которые требуют меньше энергии для производства или обладают лучшими экологическими характеристиками.

Стоит упомянуть о переработке и повторном использовании цветных металлов. Эти методы не только снижают необходимость в добыче нового сырья, но и сокращают объем выбросов на этапах добычи, переработки и транспортировки.

В результате таких мер, промышленность цветных металлов делает значительный вклад в усилия по борьбе с изменением климата и стремится к созданию более устойчивого и экологически безопасного производства. Эти шаги в декарбонизации отражают общемировую тенденцию к переходу на "зеленые" технологии и подходы во всех отраслях промышленности.

Также нельзя обойти вниманием прогресс в сфере химической промышленности. В контексте усилий по декарбонизации, предприятия химической отрасли активно интегрируют инновационные решения для минимизации выбросов парниковых газов.

Основное внимание в химической промышленности сейчас уделяется разработке и внедрению более чистых технологий производства, которые позволяют сократить объем выбросов на всех этапах — от сырьевой базы до окончательного продукта. Акцентируется внимание на оптимизации химических процессов, чтобы сделать их более эффективными с точки зрения потребления энергии и сырья. Переход на замкнутые циклы производства и рециркуляция отходов становятся ключевыми моментами в современной химической промышленности.

В целом, химическая промышленность делает большие шаги в сторону уменьшения своего углеродного следа, отражая тенденцию к экологически устойчивому и ответственному производству.

В пищевой промышленности также наблюдаются активные изменения в рамках глобальных усилий по декарбонизации. Предприятия этой отрасли все более осознанно подходят к вопросу уменьшения выбросов парниковых газов, применяя современные технологии и инновационные подходы.

Одним из ключевых направлений в пищевой промышленности является переход на более устойчивые источники энергии. Многие предприятия активно интегрируют солнечные панели, ветрогенераторы и другие возобновляемые источники в свои производственные цепи.

Кроме того, большое внимание уделяется оптимизации цепочки поставок. Введение методов уменьшения потерь продукции на всех этапах производства и транспортировки помогает сократить выбросы, связанные с порчей продуктов и избыточной упаковкой.

Также растет популярность использования органических и местных продуктов, что позволяет уменьшить выбросы, связанные с длительной

транспортировкой и интенсивными методами выращивания. Предприятия также внедряют технологии водосбережения и устойчивого использования ресурсов.

Важную роль в пищевой промышленности играет разработка и применение альтернативных, более экологичных упаковок, которые могут быть полностью переработаны или биологически разлагаемы.

В общем и целом, пищевая промышленность активно движется в сторону устойчивого развития, осознавая свою ответственность перед окружающей средой и будущими поколениями.

Минеральная промышленность также активно адаптируется к требованиям современного мира в рамках стратегии декарбонизации. Этот сектор реализует ряд ключевых изменений для уменьшения своего углеродного следа.

Первостепенное внимание уделяется внедрению современных и более эффективных технологий добычи минералов. Это позволяет сократить не только объем выбросов на этапе добычи, но и уменьшить потребление ресурсов, таких как вода и электроэнергия.

Большой акцент ставится на повышение эффективности производственных процессов. Внедрение автоматизированных систем и использование передовых технологий позволяют оптимизировать процесс добычи и обработки минералов, что приводит к уменьшению выбросов.

В минеральной промышленности, при создании цемента основная часть технологических выбросов возникает из-за процесса обжига известняка (карбоната кальция). Этот процесс направлен на удаление углерода из карбоната для получения извести (оксида кальция). Затем полученная известь используется для производства клинкера. Этот этап химической реакции превращения известняка в известь становится причиной одного из самых крупных источников выбросов углекислого газа во всей цементной промышленности. Рассматриваются разные подходы к модификации цементного состава, прежде всего путем уменьшения содержания клинкера, что в свою очередь может привести к уменьшению соответствующих выбросов на порядка 30%.

Особое внимание ученых и специалистов в этой области приковано к поиску и использованию альтернативных строительных материалов, а также к разработке новых концепций архитектурного дизайна. Эти инновации могут дать сокращение выбросов на уровне до 9% или даже больше при учете всего производственного процесса, включая потребление электроэнергии.

Одним из инновационных методов является создание такого материала как бетон с углеродным отверждением. Основная идея этого метода заключается в использовании уникальной способности цемента абсорбировать CO2. В этом процессе CO2 вводится в цемент на стадии его изготовления. Этот подход не только способствует долгосрочному сохранению углекислого газа внутри конечного продукта, но и служит для улучшения его физических свойств. Применение этой методики может стать революционным в плане снижения углеродного следа от цементного производства и может стимулировать спрос на улавливание углерода из других промышленных отраслей.

На общем фоне стремления к декарбонизации промышленности, необходимо учитывать, что многие методы требуют значительной модернизации оборудования и перестройки производственных линий. Так, целью становится не просто изменение процессов, но и создание возможности для их дальнейшей модернизации – от технологий с низким уровнем выбросов к полностью безуглеродным. Несмотря на то, что некоторые передовые технологии могут быть недоступны для некоторых производителей из-за высокой стоимости, переходные решения и улучшенные процедуры уже создают базу для полного исключения выбросов парниковых газов в ближайшем будущем.

Для успешной декарбонизации промышленного сектора, имеющего важное значение для экономики и окружающей среды, необходимо рассмотреть и реализовать ряд стратегических мер.

Во-первых, утилизация низкотемпературного тепла и активные действия по сокращению потерь тепла являются важным аспектом. Это не только поможет снизить издержки, но и повысить эффективность производства.

Во-вторых, нужно акцентировать внимание на развитии специализации и углубленной кооперации в использовании производств, которые базируются на наиболее передовых и энергоэффективных технологиях. Это создаст условия для того, чтобы отрасль могла быстрее и легче адаптироваться к изменяющимся экологическим требованиям.

Оптимизация технологических процессов также играет роль: она должна направляться на снижение потребления тепла и утилизацию излишнего тепла, что приведет к снижению загрязнения и более рациональному использованию ресурсов на промышленных предприятиях.

Внедрение современных энергоэффективных технологий, а также использование инновационных приборов и материалов с высокими энергосберегающими свойствами, станет одним из ключевых путей к декарбонизации.

Другой важный аспект — это широкое применение прямого восстановления железа (DRI). Этот процесс может стать заменой более углеродоемким методам.

Кроме того, необходимо расширять использование водорода, особенно в сочетании с электродуговыми печами при производстве алюминия и стали. Водород представляет собой чистое топливо, которое может помочь в снижении выбросов углерода.

Для строительной индустрии актуально развитие производства низкоуглеродного цемента и стали. Эти компоненты являются основой многих строительных проектов, и их декарбонизация имеет решающее значение.

Следует постоянно исследовать и применять другие подходы и методики декарбонизации для промышленного сектора, чтобы обеспечить его устойчивое развитие в будущем.

2.9. Транспортный сектор

Экономический рост и развитие за последние несколько декад привели к

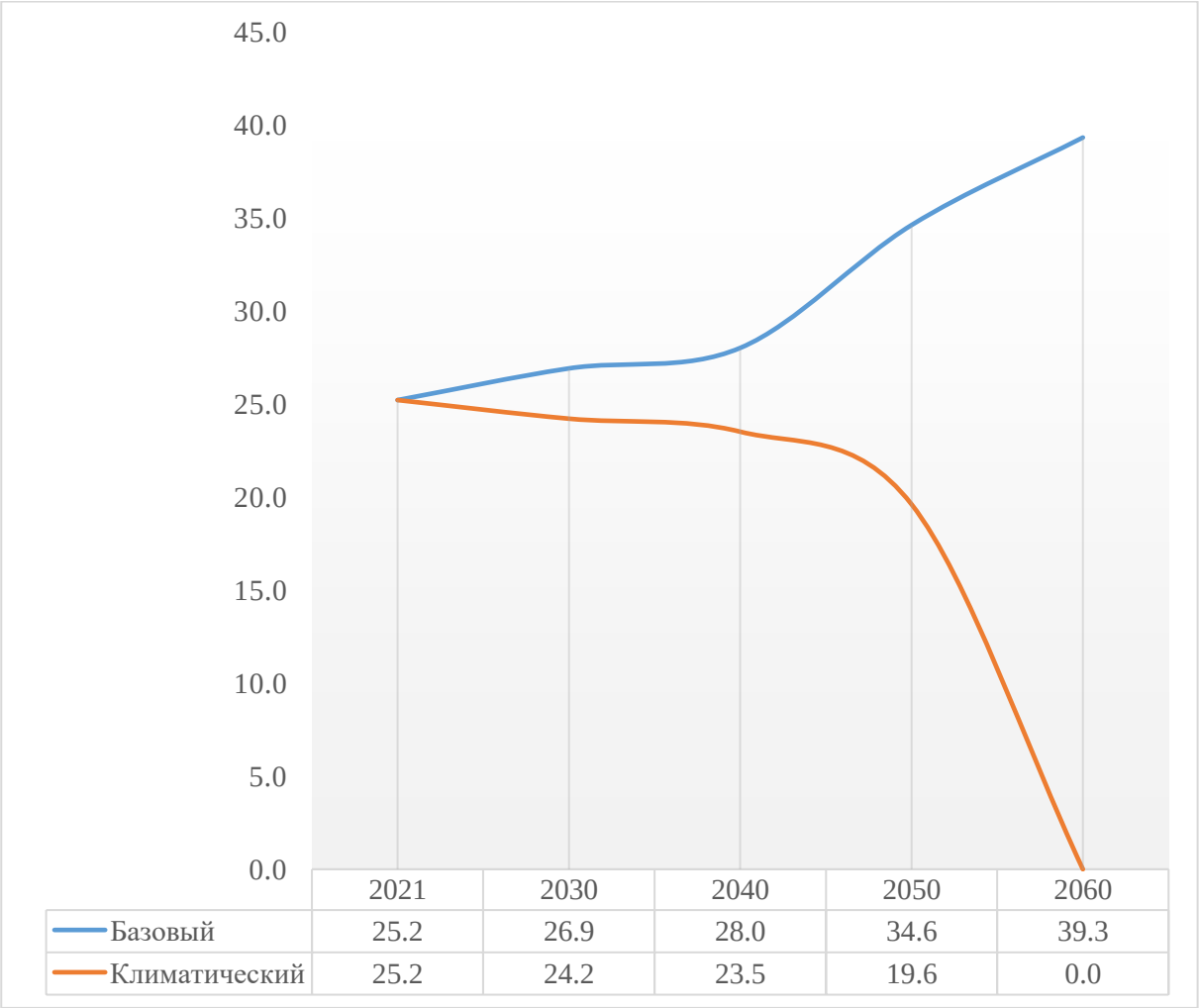
заметному росту активности в транспортной индустрии. Как непосредственное последствие этой активности, количество транспортных средств на дорогах значительно возросло, что, в свою очередь, привело к увеличению выбросов вредных парниковых газов в атмосферу.

На данный момент, большинство транспортных средств, особенно в секторе дорожного транспорта, работает на ископаемом топливе. Это делает транспортный сектор одним из главных источников выбросов парниковых газов, что является серьезной экологической проблемой.

В Республике Казахстан, как и во многих других странах, большую часть дорожного транспорта составляют легковые автомобили, принадлежащие частным лицам. Именно эта категория транспортных средств вносит значительный вклад в общий объем выбросов парниковых газов от транспортного сектора.

Однако стоит отметить, что хотя доля дорожного транспорта в общем объеме выбросов парниковых газов высока, это также связано с тем, что в Республике Казахстан достаточно высокий уровень моторизации населения. При этом, многие из существующих автомобилей на дорогах являются старыми или не соответствуют современным экологическим стандартам, что усугубляет проблему загрязнения воздуха.

Ниже представлены выбросы парниковых газов от транспортного сектора.



	2021	2030	2040	2050	2060
Базовый	25.2	26.9	28.0	34.6	39.3
Климатический	25.2	24.2	23.5	19.6	0.0

Рисунок 2.9.1. Сценарии развития выбросов парниковых газов в транспортном секторе, MtCO2экв

В целом, согласно Стратегии по достижению углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года, развитие транспортного сектора должно осуществляться в соответствии с концепцией «Избегание-Сдвиг-Улучшение» (ASI). В секторе транспорта меры по декарбонизации будут осуществляться по трем основным направлениям:

1) исключение или сокращение потребности в поездках;
2) переход на более экологичные виды транспорта;
3) повышение эффективности использования энергии и снижение выбросов от транспортных средств.

В климатическом сценарии прогнозируется снижение энерго- и углеродоемкости в транспорте, так что конечный спрос на энергию и выбросы парниковых газов от транспорта снижаются. К 2060 году конечный спрос на энергию в транспорте снизится в климатическом сценарии на 29% по сравнению с текущим уровнем и на 50% по сравнению с базовым сценарием. Это говорит об увеличении эффективности транспортных средств.

Таблица 2.9.1. Потребление энергии по видам транспорта и видам топлива, тыс. тнэ

	Факт	**Базовый**				**Климатический**			
	2021	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**
Нефтепродукты	6167	7986	8918	8615	8976	6544	5550	4603	1348
Сжиженный нефтяной газ	1238	1152	1145	1627	1280	900	24	0	0
Природный газ	296	630	833	958	1017	589	866	919	0
Электричество	326	118	127	114	102	299	1021	1608	3288
Биотопливо	0	0	0	0	0	0	0	143	143
Водород	0	0	0	0	0	0	36	138	954
Всего	**8027**	**9886**	**11023**	**11313**	**11376**	**8332**	**7497**	**7410**	**5733**
Автомобили	4414	4626	4489	4404	4462	3295	1401	1083	955
Прочий дорожный транспорт	2851	4177	5085	5132	4991	3805	4472	4463	3072
Железнодорожный транспорт	714	584	799	946	1010	586	766	869	751
Водный транспорт	1	5	7	8	8	7	8	9	9
Авиатранспорт	47	494	644	824	905	639	850	986	945
Всего	**8027**	**9886**	**11023**	**11313**	**11376**	**8331**	**7497**	**7410**	**5733**

Имеются ряд факторов, которые препятствуют декарбонизации транспортного сектора. Эти факторы создают ряд проблем и вызовов, с которыми нужно активно работать на разных уровнях.

Во-первых, учитывая низкую плотность населения, относительно низкий уровень урбанизации и большие расстояния между населенными пунктами, уровень моторизации в ряде регионов, вероятно, останется на высоком уровне даже в ближайшие годы. Это связано с тем, что автомобиль для многих является основным, а иногда и единственным, средством передвижения. Наибольшее снижение моторизации, возможно, будет достигнуто в городах, где есть потенциал для развития общественного транспорта, а также пешеходных зон и велодорожек. Продвижение индивидуальных видов мобильности, таких как велосипеды или

скутеры, может стать альтернативой для коротких расстояний.

Во-вторых, обновление транспортного парка — это не просто замена старых автомобилей на новые. Это также переход на более чистые и современные технологии, такие как автомобили на сжиженном нефтяном газе, электромобили или даже гибридные автомобили. Однако такое обновление требует дополнительных расходов со стороны домохозяйств. В этой связи, правительство и местные органы власти должны разрабатывать и реализовывать соответствующую политику по стимулированию и поддержке использования экологичного транспорта.

В-третьих, переход на более чистые технологии — это не только вопрос выбора автомобиля, но и создание соответствующей инфраструктуры.

Газификация и электрификация автомобильного транспорта представляют собой две ключевые меры для снижения интенсивности выбросов парниковых газов в атмосферу. Данные методы, особенно когда рассматриваются в комплексе, могут привести к значительному уменьшению воздействия транспортного сектора на окружающую среду. Однако только технологические изменения недостаточны. Для достижения наибольшего эффекта необходимо также переосмыслить и изменить парадигму спроса на мобильность.

Исключение частного использования автомобилей и сокращение зависимости от высокоуглеродных видов транспорта, таких как авиация, становятся жизненно важными аспектами в этом процессе. Эти действия потребуют существенных инвестиций не только в создание и модернизацию благоприятной инфраструктуры, но и в стимулирование изменений в поведении потребителей. При этом, как и в любом процессе инноваций, следует ожидать определенных сопутствующих выгод.

Транспортный сектор, будучи одним из наиболее значимых источников выбросов, предоставляет множество возможностей для инноваций. Переход к более "зеленым" или экологичным технологиям может привести к таким прямым выгодам, как снижение уровня загрязнения воздуха, что в свою очередь ведет к улучшению общественного здоровья, уменьшение количества дорожно-транспортных происшествий и, следовательно, уменьшение связанных с ними рисков для жителей, а также снижение уровня шума, что делает городские пространства более комфортными для жизни.

Что касается долгосрочного развития транспортного сектора, здесь следует опираться на концепцию "Избегание-Сдвиг-Улучшение" (ASI). Это значит, что в первую очередь следует уменьшать потребность в передвижениях или исключать ее; во-вторых, стимулировать переход на более экологичные средства передвижения, такие как общественный транспорт или велосипеды; и в-третьих, улучшать эффективность и экологичность самих транспортных средств, что включает в себя разработку и внедрение новых технологий и стандартов.

Климатический сценарий транспорта подчеркивает актуальность и неотложность вопроса более ответственного и осознанного отношения к развитию и модернизации транспортной инфраструктуры. Понимая, что экономический рост и развитие приведут к увеличению потребности в грузоперевозках и пассажирских

перевозках, стратегия подразумевает, что можно нейтрализовать потенциальный негативный воздействие этого роста. Это может быть достигнуто путем целенаправленных инвестиций в экологически чистые источники энергии, а также в передовые и устойчивые транспортные решения и инновации.

Этот подход не просто абстрактное или теоретическое предложение. На практике это представляет собой реалистичный и практический план действий, направленный на обеспечение такого развития транспортного сектора, при котором, даже при росте экономической активности и увеличении потребности в транспортных услугах, будет наблюдаться стабильное или даже снижение уровня выбросов парниковых газов. Таким образом, мы можем не только обеспечивать свои текущие потребности, но и заботиться о сохранении благоприятного окружающего мира для будущих поколений.

В самом сердце декарбонизационного транспортного процесса лежит концепция перехода к более экологически чистым и устойчивым источникам энергии, а также к инновационным технологиям. Основной упор делается на активное внедрение и использование новейших источников энергии и передовых методов ее получения. Одним из ключевых направлений в этом контексте является широкое применение электрических транспортных средств, которые позволят сократить выбросы в атмосферу. Кроме того, активно рассматривается интеграция гибридных систем, которые сочетают в себе преимущества различных источников энергии. Важную роль играют и водородные технологии, которые представляют собой перспективное направление в области энергетики. Комбинирование всех этих подходов и технологий позволит не только существенно уменьшить наш экологический след, но и создать надежную, устойчивую транспортную систему для будущих поколений, способную отвечать вызовам времени.

Для успешной декарбонизации сектора транспорта, особое внимание стоит уделить целому ряду ключевых и стратегических мер. В первую очередь, нужно думать о системном улучшении городского планирования, что включает в себя не только оптимизацию транспортной инфраструктуры, но и создание комфортного пространства для жителей.

Развитие устойчивой городской мобильности также является важной частью этого процесса. Это включает в себя не только повышение качества и доступности общественного транспорта, но и привлечение населения к использованию альтернативных видов передвижения, таких как велосипеды или пешеходные зоны.

Электрификация и газификация общественного транспорта, безусловно, сыграют ключевую роль в снижении выбросов углерода. С этой целью следует активно разрабатывать зарядную инфраструктуру, которая будет использовать альтернативные и возобновляемые источники энергии. Дополнительно, дальнейшая электрификация железных дорог поможет снизить зависимость от традиционных источников энергии.

Оптимизация пассажирских и грузовых перевозок включает в себя рациональное использование транспортных средств, уменьшение числа пустых рейсов и другие меры. Развитие мультимодальных перевозок поможет сделать процесс перевозки более гибким и экологичным.

Стимулирование производителей и потребителей к использованию транспорта, работающего на альтернативных и возобновляемых источниках энергии, также считается приоритетом. С этой целью можно внедрять различные стимулирующие меры, такие как налоговые льготы или субсидии.

Не стоит забывать и о развитии отечественного производства транспортных средств, которое будет ориентировано на использование экологически чистых технологий.

В заключение, разносторонний и комплексный подход к декарбонизации сектора транспорта позволит достичь значимых результатов в борьбе с изменением климата и создании устойчивой экосистемы для будущих поколений.

2.10. Сектор жилищно-коммунального хозяйства

Данный сектор охватывает коммерческий сектор и сектор населения. Часто этот сектор также называют сектором зданий.

Республика Казахстан — это страна, которая испытывает особенности континентального климата, при этом крайности температурных режимов пронизывают её глубоко. Очень холодные зимы с резкими морозами и лето, порой достигающее высоких температурных показателей, требуют от населения принимать меры по поддержанию комфортных условий в жилых и рабочих помещениях. В этих условиях стимулируется высокий спрос на энергию не только для отопления, но и для охлаждения зданий в летний период.

Особенностью Республики Казахстан является тот факт, что средний уровень энергопотребления в секторе зданий довольно высок и составляет примерно 270 кВт*ч/м2 в год. Этот показатель, безусловно, выделяет страну на фоне многих европейских государств, где аналогичные значения составляют всего 100-120 кВт*ч/м2. В сравнении с соседней Россией, которая также известна своими резкими климатическими условиями и где средний показатель энергопотребления в секторе зданий равен 210 кВт*ч/м2, Республика Казахстан занимает одно из лидирующих мест по этому параметру. Эти данные подчёркивают актуальность внедрения энергоэффективных технологий и поиска альтернативных источников энергии для Республики Казахстан.

Основной причиной того, что здания часто не отвечают стандартам энергоэффективности, помимо воздействия суровых климатических условий, является огромное количество потерь энергии. Это связано с недостаточной или неэффективной теплоизоляцией, которая применяется в строительстве. Проблема усугубляется тем, что многие здания, особенно старые, не соответствуют современным стандартам изоляции.

Большая часть потерь тепла в зданиях происходит из-за наличия сквозняков и проблем с вентиляционными системами, что составляет 56% всех потерь. Далее следуют потери через стены, которые, к сожалению, зачастую не обеспечены достаточным уровнем утепления. Этот показатель достигает 22%. Оконные проемы также являются причиной значительных потерь энергии. Именно через них происходит 14% всех потерь тепла. И, наконец, последние 8% приходятся на

потери через полы, что также свидетельствует о необходимости улучшения методов их изоляции в некоторых зданиях.

Таким образом, для увеличения энергоэффективности зданий необходимо уделять особое внимание качеству теплоизоляционных материалов и технологий, а также регулярно проводить диагностику и модернизацию уже существующих объектов.

Доля зданий в Республике Казахстан, которые не соответствуют современным энергетическим стандартам, занимает существенную часть. Это связано с тем, что большая часть зданий была построена давно и с течением времени их техническое состояние ухудшается. Из общего числа 2,4 млн. зданий в стране порядка 31,5% домов имеют возраст более 50 лет, что делает их потенциально уязвимыми к различным эксплуатационным проблемам. Добавляя к этому, еще 32,9% зданий отмечаются как объекты, возраст которых превышает 25 лет. Всё это свидетельствует о том, что многие из них могут не соответствовать современным стандартам безопасности и энергоэффективности. Так, по данным 2021 года, 34% многоквартирных домов остро нуждались в проведении капитального ремонта, что подчеркивает важность обновления и модернизации жилищного фонда страны.

С долей частного домовладения, достигающей уровня выше 90%, Республика Казахстан заслуженно входит в топ стран мира по уровню частного владения жилой недвижимостью. Эта высокая доля является прямым итогом масштабной приватизации жилых объектов, которая имела место в Республике Казахстан в начале 1990-х годов. В тот период жильцы имели уникальную возможность законно перевести в собственность квартиры, в которых они проживали. Структурные элементы здания, включая кровлю, облицовку, лестничные клетки, лифты, перекрытия и различные инженерные системы, являются общей собственностью всех жильцов. В силу этого каждый собственник несет свою долю ответственности за содержание и ремонт этих общих частей дома. Они регулярно вносят определенные взносы, предназначенные для управления и обслуживания общего имущества.

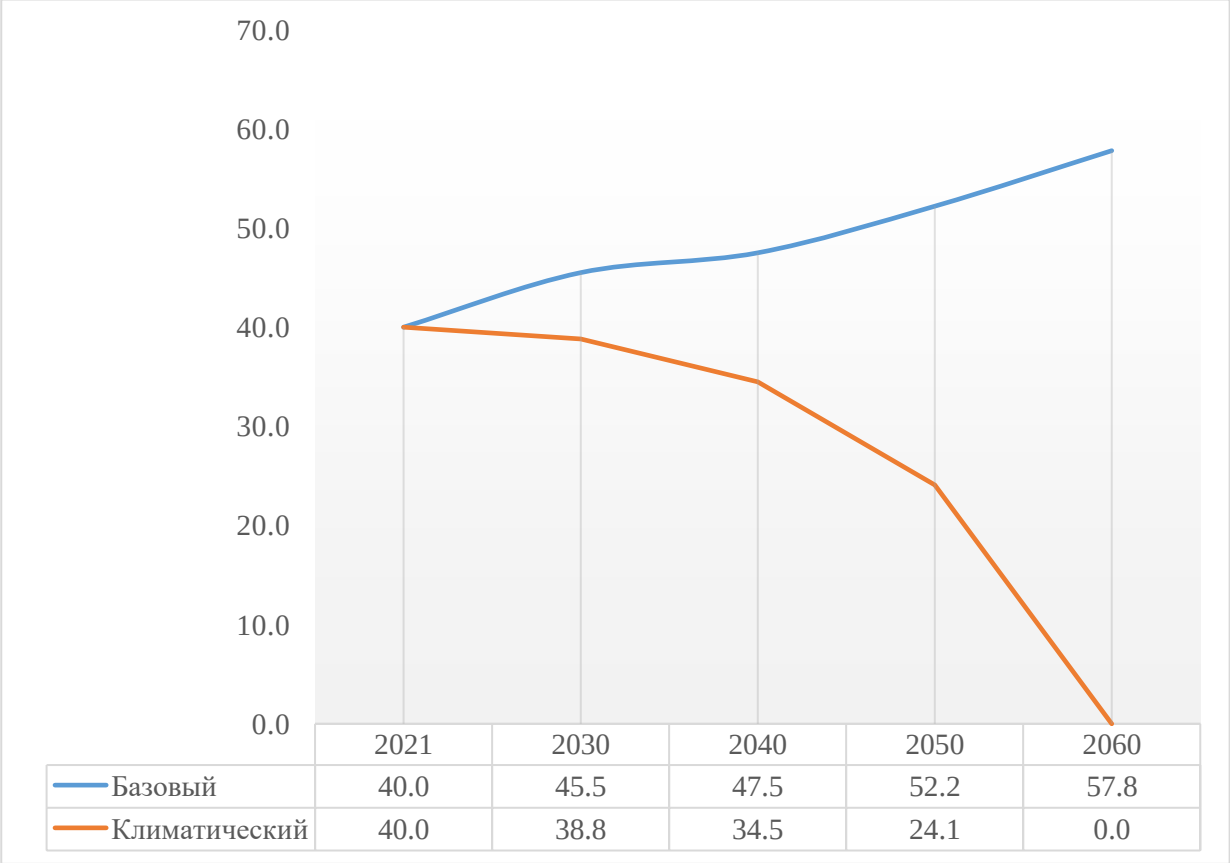


Рисунок 2.10.1. Сценарии развития выбросов парниковых газов в секторе жилищно-коммунального хозяйства, МтСО2экв

Учитывая разнообразие интересов и социальное положение собственников, а также текущую планировку многоквартирных домов и отсутствие стимулов к контролю за потреблением энергии, жильцы редко инвестируют в проекты термомодернизации. Эту ситуацию усугубляют относительно низкие тарифы на электроэнергию в стране, делая срок окупаемости инвестиций в энергоэффективность чересчур долгим из-за экономии на потреблении энергии.

Учитывая климатические условия нашего региона и текущее качество теплоизоляции большинства зданий, можно с уверенностью сказать, что производство тепла становится одним из главных источников выбросов, исходящих от данных объектов. Большая часть этого тепла, к сожалению, производится за счет прямого сжигания ископаемых видов топлива. Это происходит или на месте, или в небольших, местных котельных установках.

В сельских районах ситуация еще более остро стоит перед нами. Там значительная часть тепла получается путем сжигания таких источников топлива, как уголь и различные нефтепродукты. Эти способы обогрева весьма неэффективны с экологической точки зрения и способствуют большому количеству выбросов парниковых газов в атмосферу.

В крупных городских агломерациях централизованные системы теплоснабжения ответственны за удовлетворение примерно половины всего теплового потребления. Однако из-за недостатка инвестиций в старые и изношенные инфраструктуры этих сетей мы сталкиваемся с проблемой высоких

потерь энергии. При распределении тепла до трети всей подаваемой энергии теряется из-за устаревших систем и неэффективности сети. В связи с этим, за последние несколько лет было замечено возрастающее внимание к проектам по реконструкции и модернизации этих тепловых систем, а также к регулярному техническому обслуживанию. Такой подход и направленность на обновление инфраструктуры является ключевым для того, чтобы дальше повышать энергоэффективность в области строительства и эксплуатации зданий. Кроме того, нельзя забывать, что проблема выбросов в атмосферу, особенно в городских зонах, напрямую связана с процессами декарбонизации в сферах производства тепловой и электрической энергии. Поэтому, учитывая важность этой проблемы, акцентируется внимание на необходимости перехода к более экологичным источникам энергии.

В свете активного роста численности населения и нарастающей потребности в жилищной инфраструктуре, актуальной становится задача увеличения жилищного фонда на душу населения. Учитывая текущие тенденции и планирование развития городской инфраструктуры, в ближайшие пять лет предполагается увеличение объема жилых зданий на треть. Эта стратегия не только отвечает на социальные потребности граждан, но и ставит перед строителями и градостроителями новые задачи.

Одной из важнейших проблем современности, без сомнения, является растущее энергопотребление и с этим связанные увеличивающиеся выбросы парниковых газов. Это актуальный вопрос, который требует нашего особого внимания и активных действий. Сокращение энергопотребления и снижение парниковых выбросов в атмосферу стоит в центре многих дискуссий и исследований. В этом контексте современные здания и сооружения становятся ключевыми элементами изменений, и именно они требуют качественной модернизации в соответствии с актуальными стандартами энергоэффективности.

Хотя проблема выглядит сложной, необходимо осознать, что существующие условия в жилищном секторе, несмотря на все вызовы, открываются уникальные возможности. Имеется шанс применить новейшие технологии, инновационные методы и передовые подходы в области строительства, реконструкции и обновления инфраструктуры зданий. Этот момент может стать отправной точкой для глубокой трансформации жилищного строительства нашей страны, переосмысления стандартов и качества предоставляемого жилья, а также методов его строительства и эксплуатации.

Выбросы в секторе жилищно-коммунального хозяйства связаны с использованием энергии коммерческим и государственным сектором и домохозяйствами, т.е. потреблением электроэнергии, тепла и прямым использованием первичной энергии (например, для приготовления пищи, индивидуального отопления и т.д.). Ниже представлен конечный спрос на энергоресурсы по видам топлива.

Таблица 2.10.1. Конечный спрос на энергию в зданиях по видам топлива и направлениям использования, тыс. тнэ

	Факт	**Базовый**				**Климатический**			
	2021	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**
Уголь	4520	4972	5198	5424	5650	3164	2260	904	0
Природный газ	4759	5235	5473	5710	5948	3331	2379	952	0
Нефтепродукты	3073	3380	3533	3687	3841	2151	1536	615	0
Биотопливо	23	59	102	257	688	58	103	250	380
Тепловые насосы (геотермия)	0	0	0	0	0	97	107	459	989
Гелиоколлекторы	0	0	0	0	0	0	0	341	1198
Электроэнергия	3186	3560	3950	4159	4605	3916	5135	8318	13815
Теплоэнергия	4683	5101	6305	6977	7814	5612	6935	10465	15628
Всего	**20243**	**22313**	**24561**	**26215**	**28546**	**18329**	**18456**	**22304**	**32010**

Как видно, потребление конечной энергии возрастает по сценариям более чем в полтора раза, повторяя динамику роста населения, которое является основным конечным потребителем.

Чтобы успешно сократить объем выбросов парниковых газов от зданий, требуются крупномасштабные инвестиции в различные технологические направления и стратегии. В первую очередь, важно акцентировать внимание на газификацию и электрификацию систем отопления, так как они представляют собой перспективные способы снижения выбросов парниковых газов в атмосферу.

Кроме этого, растет осознание важности использования возобновляемых источников энергии в качестве альтернативы ископаемым топливам. Например, интеграция систем, использующих тепловую солнечную энергию и фотовольтаические панели, может стать не только прекрасной альтернативой традиционным способам обогрева, но и способствовать устойчивому развитию городской инфраструктуры. Подобные технологии не только повышают энергетическую эффективность, но и помогают снизить экологический отпечаток зданий, делая их более "зелеными" и экологически безопасными. Вложение средств в эти направления не только поможет бороться с изменением климата, но и станет важным шагом на пути к устойчивому развитию городских агломераций.

Увеличение энергоэффективности играет центральную роль в современной экономике, так как это приводит к оптимизации производственных и других процессов. Когда предприятия и домохозяйства начинают меньше потреблять электроэнергии или иных ресурсов, это автоматически ведет к снижению затрат на эти ресурсы. Такой подход не только экономически выгоден, но и способствует уменьшению общего объема выбросов в атмосферу.

Использование современных, энергоэффективных технологий и методов, безусловно, является ключевым фактором в уменьшении экологического следа не только конкретного сектора, но и целых регионов и стран. Сегодня многие компании осознают значимость этого вопроса и активно внедряют передовые разработки в свою деятельность. Такой подход не только повышает конкурентоспособность предприятий на мировом рынке, но и способствует созданию экологически устойчивого будущего для всех нас.

Декарбонизация сектора жилищно-коммунального хозяйства стоит в центре внимания экологически осознанных стран. Она подразумевает снижение выбросов углекислого газа и других парниковых газов в этом секторе. Для эффективного движения в этом направлении нужна грамотная реализация ряда ключевых мер.

Прежде всего, наибольший акцент стоит делать на повышение энергоэффективности зданий. Это подразумевает использование современных теплоизоляционных материалов, системы управления энергопотреблением и энергосберегающих технологий во всем здании.

Затем следует заняться модернизацией централизованного теплоснабжения. Современные технологии позволяют существенно уменьшить потери тепла при передаче и делать это наиболее экономически выгодно.

Также необходимо активное внедрение возобновляемых источников энергии. Это могут быть солнечные панели, ветряные генераторы, тепловые насосы и другие технологии. Они позволят значительно снизить зависимость от ископаемых источников топлива.

Эффективные технологии для отопления помещений и горячего водоснабжения также играют ключевую роль. Они помогут обеспечивать комфортные условия для жильцов, при этом минимизируя энергопотребление.

Очень важно установить жесткие требования по энергетической эффективности новых жилых, общественных и промышленных зданий. Эти требования должны быть не ниже класса С, что обеспечит высокую энергоэффективность объекта.

Введение системы мониторинга, отчетности и верификации энергоэффективности зданий позволит контролировать выполнение установленных стандартов и норм. Это даст возможность оперативно корректировать действия и принимать меры по улучшению эффективности.

Масштабное внедрение автоматизированных систем контроля и учёта тепловой энергии обеспечит точный учет и позволит оптимизировать потребление.

И наконец, необходима энергоэффективная модернизация уже существующих централизованно и индивидуально отапливаемых зданий, а также

систем горячего водоснабжения и отопления. Это позволит сделать их менее энергозатратными и экологически чистыми.

Декарбонизация сектора жилищно-коммунального хозяйства требует применения инновационных и долгосрочных решений, чтобы соответствовать текущим экологическим требованиям и улучшить устойчивость городской среды.

Одной из ключевых инноваций последних лет являются интеллектуальные системы управления зданиями. Эти системы, используя принципы машинного обучения и аналитику больших данных, позволяют в реальном времени анализировать потребление энергии, ресурсов и оптимизировать их использование. С их помощью можно адаптировать энергопотребление под текущие потребности здания, предсказывать неэффективное использование ресурсов и автоматически корректировать режимы работы различных систем.

Современные технологии в области материаловедения также играют важную роль. Фотовольтаические окна, к примеру, не просто обеспечивают здания светом, но и способны преобразовывать солнечную энергию в электричество, обеспечивая дополнительные источники питания. Теплоизоляционные покрытия на основе нанотехнологий обеспечивают высокую эффективность зданий, сохраняя тепло зимой и прохладу летом, что снижает зависимость от внешних источников энергии.

Еще одно важное направление — использование геотермальной энергии. Глубоко под землей температурные условия остаются стабильными, и это может быть использовано для создания систем отопления и охлаждения зданий, которые существенно экономят энергию и снижают экологический след.

Помимо этого, интеграция инфраструктуры для электромобилей в современные здания становится все более актуальной. Многие новые объекты сегодня оборудуются станциями быстрой зарядки и зонами для парковки электротранспорта, что стимулирует переход на более экологичные средства передвижения.

Долгосрочное планирование также требует включения устойчивых городских практик. Это включает в себя создание большего числа зеленых зон, парков и мест отдыха, которые способствуют улучшению качества воздуха, повышению биоразнообразия и обогащению социокультурной жизни горожан.

Таким образом, декарбонизация сектора жилищно-коммунального хозяйства — это не просто технологический процесс, это целостный подход, объединяющий инновации, экологическую ответственность и стремление к созданию устойчивых и комфортных городских пространств для будущих поколений.

2.11. Сельское хозяйство

Сельскохозяйственное производство играет двойственную роль в вопросах экологии. С одной стороны, оно активно влияет на состояние окружающей среды, вызывая изменения в природных экосистемах. Эти изменения могут проявляться в виде потепления климата, уменьшения доступности водных ресурсов, интенсивной деградации почвенных слоев, а также в виде обезлесения и изменения биоразнообразия. Воздействие сельского хозяйства на природу является одним из

ключевых факторов, который оказывает огромный экологический эффект на планету.

С другой стороны, само сельскохозяйственное производство также подвергается воздействию протекающих в природе процессов. Изменение климата может повлиять на урожайность и качество сельскохозяйственных культур, а деградация земель снижает их плодородие. Сокращение площадей лесов, в свою очередь, влияет на регуляцию водного баланса и сохранение микроклимата. Все эти факторы ставят перед сельским хозяйством сложные задачи по подбору культур и методов возделывания, которые были бы наиболее устойчивы к меняющимся условиям и при этом минимально вредили бы окружающей среде.

Сжигание топлива в сельском хозяйстве является одним из основных источников выбросов парниковых газов и других вредных веществ в атмосферу. Это актуально как для развитых, так и для развивающихся стран, где механизация сельскохозяйственных работ находится на разных этапах внедрения.

Традиционные источники топлива, такие как дизельное топливо и бензин, широко используются в сельскохозяйственной технике: тракторах, комбайнах, погрузчиках и других машинах. С учетом глобального изменения климата и необходимости сокращения выбросов, многие страны начинают искать альтернативные источники топлива и методы эффективного их использования в сельскохозяйственном секторе. Биотопливо, производимое из сельскохозяйственных отходов или специально выращенных культур, становится все более популярным. Его применение позволяет уменьшить углеродный след и сделать производство менее вредным для окружающей среды. Тем не менее, переход на альтернативные источники топлива требует значительных инвестиций. Необходимо модернизировать существующую технику, адаптировать ее к новым видам топлива и обучить персонал. Кроме того, производство и распределение биотоплива также имеют свои экологические и социальные последствия. В итоге, сжигание топлива в сельском хозяйстве остается актуальной проблемой, требующей комплексного подхода и инновационных решений для сокращения вредных воздействий на окружающую среду и здоровье людей.

Ниже представлены выбросы в сельском хозяйстве в части сжигания топлива.

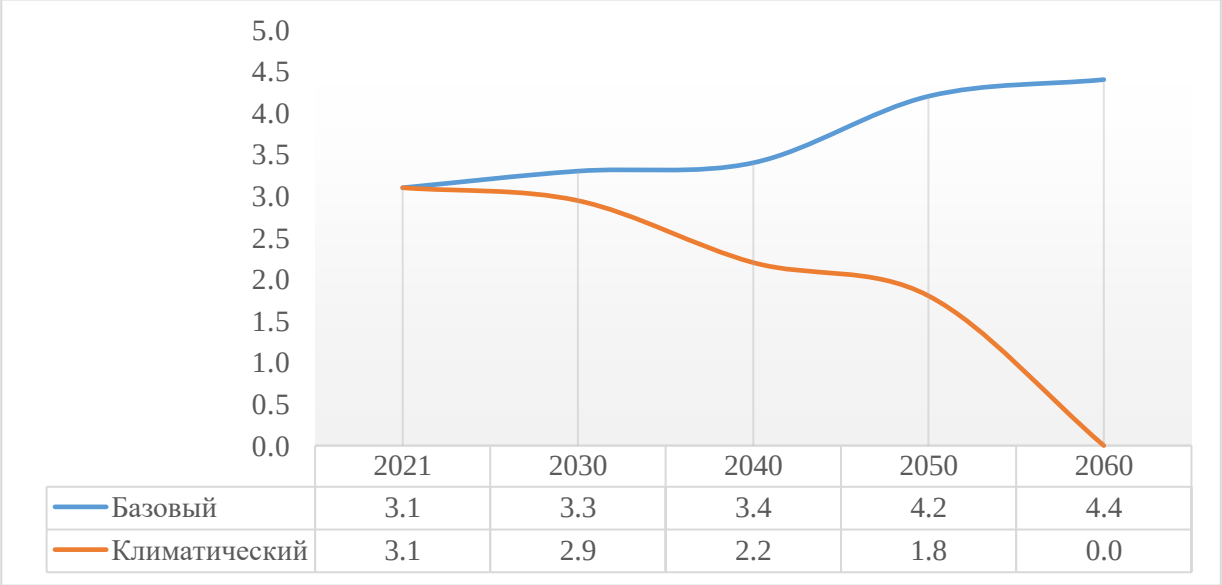


Рисунок 2.11.1. Выбросы в сельском хозяйстве в части сжигания топлива, МтСО2экв

Методы декарбонизации в сельском хозяйстве аналогичны тем, что применяются в энергетических секторах, таких как строительство, транспорт, производство электричества и тепла. Дальнейшие рекомендации по изменению структуры использования топлива в аграрном секторе представлены далее.

Таблица 2.11.1. Конечный спрос на энергию в сельском хозяйстве по видам топлива и отраслям, тыс. тнэ

	Факт	**Базовый**				**Климатический**			
	2021	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**
Уголь	106.1	18.7	0	0	0	18.7	0	0	0
Нефтепродукты	549.1	785.5	871.5	935.5	976.4	795	927.9	534.1	0
Природный газ	74.7	16.1	14.1	0	0	15.8	13.8	0	0
Электричество	166.2	17.8	12.3	13	13.6	18	29.7	62.2	95.3
Теплоэнергия	77.2	90.5	80.4	72	62.3	92.1	91.6	92.5	89.8
Биотопливо	0	33.7	33.5	0	0	34.1	34	512.9	1168.1
Геотермия	0	30.6	38.1	50.9	56.6	31.5	44.9	65.5	81.7
Всего	**973.3**	**992.8**	**1050.1**	**1071.4**	**1108.9**	**1005.2**	**1141.8**	**1267.2**	**1435**

Снижение выбросов парниковых газов при сжигании топлива в сельском хозяйстве требует комплексного подхода и внедрения ряда мер. Одним из главных направлений является переход на альтернативные виды топлива. Биотопливо, полученное из отходов растительности, животноводства или специально выращенных культур, может стать важным инструментом в решении проблемы,

поскольку при его сгорании выделяется меньше углекислого газа по сравнению с традиционным топливом.

Важно также обратить внимание на эффективное использование техники. Внедрение современной техники с высоким КПД и меньшим расходом топлива, а также регулярное техническое обслуживание, могут сократить объемы выбросов. Также стоит рассмотреть применение технологий прецизионного земледелия, которые позволяют точно определить, где и в каком количестве требуется применение удобрений, пестицидов или воды, что, в свою очередь, оптимизирует работу машин и уменьшает расход топлива.

Освоение электрических и гибридных технологий в сельском хозяйстве также может стать решением проблемы. В последние годы активно развивается производство электрических тракторов и другой техники, что позволяет уменьшить или полностью избавиться от сжигания топлива.

Не менее важной является осведомленность фермеров о проблеме выбросов парниковых газов и методах их снижения. Организация семинаров, тренингов и воркшопов способствует распространению лучших практик и инновационных подходов. Кроме того, агролесоводство и агроэкологические системы, включая посев деревьев на сельскохозяйственных угодьях или создание защитных лесополос, помогают компенсировать часть выбросов углекислого газа.

Повышение эффективности хранения и транспортировки продукции также может сыграть свою роль. Оптимизация логистических процессов сокращает потребность в транспортных средствах и, соответственно, в сжигании топлива. Наконец, внедрение устойчивых сельскохозяйственных практик, таких как консервативное земледелие, минимальная обработка почвы и использование органических удобрений, может уменьшить потребность в механизации и, как следствие, в сжигании топлива.

Долгосрочное видение развития сельского хозяйства в контексте уменьшения выбросов парниковых газов основывается на создании устойчивой и балансированной системы, где каждый аспект производства работает в гармонии с природой. Эта система будет поддерживать здоровье почвы, сохранять биоразнообразие и минимизировать вредное воздействие на экосистему.

Транспорт в сельском хозяйстве также претерпит революцию. Электрические и автономные транспортные средства будут активно внедряться, что позволит минимизировать выбросы и сделать процесс перевозки продукции более эффективным.

Сотрудничество и интеграция между фермерами, научными организациями и государственными учреждениями станут ключевыми в реализации этого долгосрочного видения. Создание сетей обмена знаниями и опытом поможет распространять лучшие практики и инновации быстрее и эффективнее.

Кроме того, важным аспектом станет внедрение принципов циркулярной экономики в сельском хозяйстве. Это означает, что все производственные отходы будут использоваться вновь, либо в качестве удобрений, либо для получения энергии или других продуктов.

Осознание потребителей также будет играть важную роль в формировании будущего сельского хозяйства. Предполагается, что спрос на экологически чистые, локальные и сезонные продукты будет расти. Это побудит фермеров использовать методы производства, максимально дружелюбные к окружающей среде.

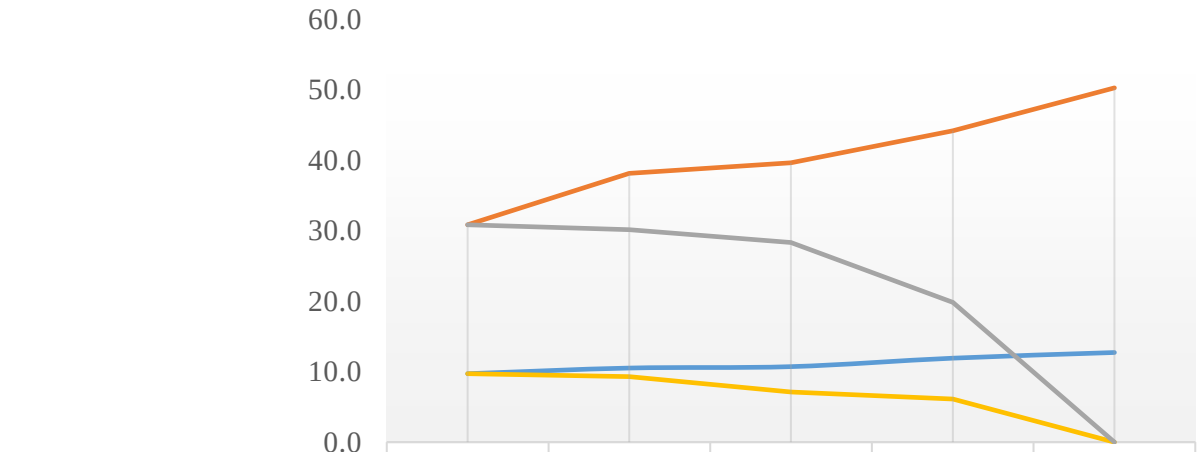
В заключение, долгосрочное видение развития сельского хозяйства направлено на создание гармоничной, устойчивой и эффективной системы, где человек и природа работают вместе ради общего блага. Хотя перед нами стоят серьезные вызовы, инновационные технологии, научные исследования и глобальное сотрудничество позволят нам двигаться в правильном направлении.

2.12. Сектор летучих эмиссий

В современной экологической ситуации особое внимание уделяется уровням выбросов парниковых газов в секторе летучих эмиссий. Это тесно связаны с политическими решениями на различных уровнях и с мерами, принимаемыми в других экономических и промышленных отраслях. Другими словами, активности в одной области могут иметь прямое воздействие на количество выбросов в другой. Если присмотреться к базовому сценарию развития этой проблематики, становится очевидным, что тенденция к увеличению выбросов сохраняется. Это особенно заметно по всем видам летучих эмиссий. Таким образом, для эффективного контроля и уменьшения уровня этих эмиссий, необходимо глобальное и комплексное рассмотрение всех связанных факторов, а также принятие координированных мер на многих уровнях управления.

С одной стороны, развитие экономики и промышленности приводит к увеличению потребления различных видов топлива. С другой стороны, если рассматривать климатический сценарий, который предполагает активную декарбонизацию, можно заметить значительное снижение выбросов летучих эмиссий. Эти эмиссии, в большой степени, связаны с использованием твердых видов топлива, таких как уголь. Необходимость охраны окружающей среды и борьбы с изменением климата приводит к тому, что этот процесс активно поддерживается на различных уровнях управления. Основной механизм этой поддержки — это сокращение потребления угольных ресурсов. Эта стратегия нацелена на замену угля более экологичными источниками энергии, такими как ветровая, солнечная и гидроэнергия. Таким образом, мир активно движется в направлении экологически устойчивого будущего, снижая зависимость от загрязняющих источников и выбирая более зеленые альтернативы.

Ниже представлены выбросы в секторе летучих эмиссий.



	2021	2030	2040	2050	2060
Базовый - Твердые виды топлива	9.7	10.5	10.7	11.9	12.7
Климатический - Твердые виды топлива	9.7	9.3	7.1	6.1	0.0
Базовый - Нефть и природный газ	30.8	38.1	39.6	44.1	50.2
Климатический - Нефть и природный газ	30.8	30.1	28.3	19.8	0.0

Рисунок 2.12.1. Выбросы парниковых газов в секторе летучих эмиссий, MtCO2экв

Касательно летучих эмиссий, которые связаны с добычей и использованием нефти и природного газа, стоит отметить, что в базовом сценарии прогнозируется их значительный рост. Причина такого роста заключается в активизации процессов газификации и в расширении использования данных видов топлива в различных областях. Многие производители и потребители выбирают их из-за их эффективности и доступности на рынке.

Однако в климатическом сценарии, который предполагает переход к более экологичным источникам энергии, происходит снижение зависимости от ископаемых видов топлива в разных секторах экономики. Это в свою очередь ведет к уменьшению добычи, транспортировки и обработки данных видов топлива. И, как непосредственное следствие этого, наблюдается значительное уменьшение уровня выбросов летучих эмиссий в атмосферу. Это подтверждает необходимость пересмотра энергетической политики в пользу более экологичных решений для сохранения окружающей среды.

На сегодняшний день Республика Казахстан находится среди десяти стран с самыми большими угольными запасами, обладая 29,4 миллиардами тонн подтвержденного угля в приблизительно 400 месторождениях [Казэнерджи, 2021]. Основные угольные районы страны находятся в северных и центральных областях, включая Экибастузский (10 млрд тонн), Карагандинский (6,9 млрд тонн) и Тургайский (5,9 млрд тонн) бассейны (см. приложенный рисунок ниже). Большая часть, или 72% угольной добычи, происходит в Карагандинской и Павлодарской областях. В Республике Казахстан 25 компаний занимаются добычей и обработкой угля, причем четыре из них обеспечивают две трети общего объема добычи. В 2022

году было добыто 113,9 миллионов тонн угля и лигнита. При этом 72% использовалось на внутренний рынок, а оставшиеся 28% были направлены на экспорт.

В 2021 году, согласно данным Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан, уголь занимал важное место в энергетическом балансе Республики Казахстан, составляя 48,8% (или 33,5 млн тонн в пересчете на нефтяной эквивалент) от общего потребления первичной энергии. Примерно 72,4% этого угля используются на тепловых электростанциях для обеспечения системы электроснабжения и централизованного теплоснабжения. Оставшаяся часть угля распределена между промышленностью, жилищным строительством, сферой услуг и другими энергетическими нуждами.

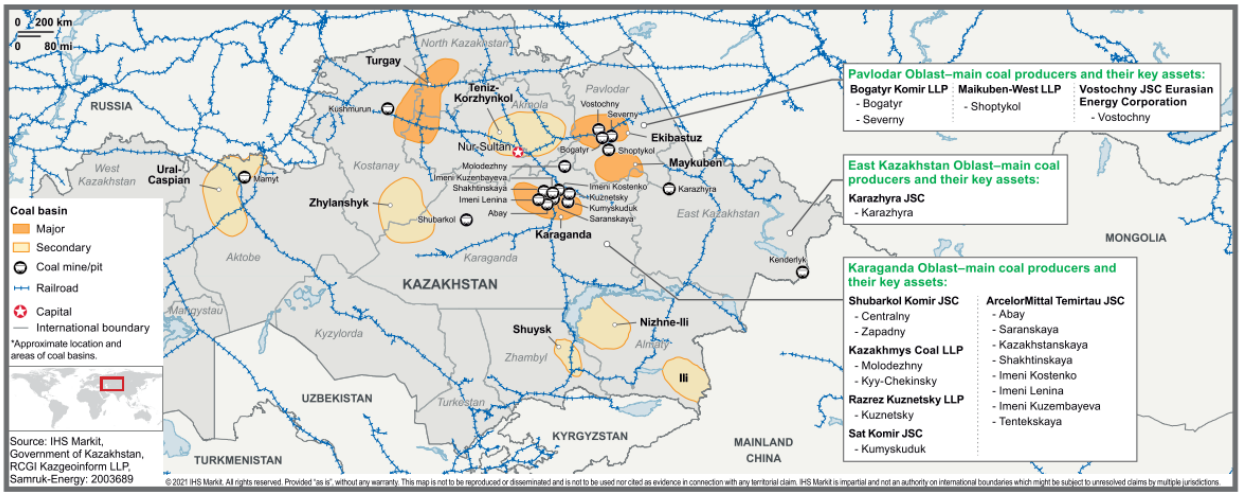


Рисунок 2.12.2. Угольные бассейны Республики Казахстан и основные производственные площадки [Казэнерджи, 2021]

Республика Казахстан намерена достигнуть углеродной нейтральности к 2060 году, согласно [СНУР, 2023]. Этот амбициозный план опирается на несколько ключевых направлений, планируется уменьшать угольное потребление постепенно, включая его использование дома и в производстве электроэнергии. Страна активизирует развитие инфраструктуры для транспортировки и распределения природного газа. Это поможет отказаться от угля в ключевых регионах, вроде Восточно-Казахстанской, Павлодарской, Карагандинской, Акмолинской и Северо-Казахстанской областей. Внедрение возобновляемых источников энергии также является приоритетом. Ожидается, что их доля в электроэнергетике увеличится с 3% в 2020 году до 15% в 2030 году, и к 2060 году они будут производить более 80% электроэнергии.

Согласно Стратегии достижения углеродной нейтральности, к 2030 году общая добыча угля в Республике Казахстан должна снизиться на 26% по сравнению с текущим уровнем. Это падение в основном связано со снижением добычи полубитуминозных углей, добыча других видов угля в этом десятилетии остается относительно стабильной. Наиболее впечатляющее падение происходит после 2030 года, когда уже к 2035 году общая добыча угля должна сократиться вдвое, а к 2050 году должно быть достигнуто 90% сокращения.

Таким образом, видно, что взаимодействие и связь между различными секторами играют решающую роль в определении уровней выбросов парниковых газов. Эти выбросы, порождаемые одним сектором, могут быть напрямую или косвенно связаны с действиями и решениями в других отраслях. Поэтому, когда речь идет о планировании долгосрочных стратегий для борьбы с изменением климата, необходимо учитывать все возможные взаимосвязи и последствия. Ведь действия в одной области могут иметь далеко идущие последствия для других областей. В этой связи, комплексное рассмотрение проблемы и глобальный подход к уменьшению выбросов становятся критически важными для достижения желаемых результатов в экологическом плане. Не учитывать эту многогранность и взаимозависимость может привести к непредсказуемым и нежелательным последствиям.

3. Заключение

В завершении представленной главы стоит подчеркнуть важность применения технико-экономического моделирования в энергетической системе Республики Казахстан. Использование генератора моделей TIMES в данном контексте обрело значительное признание, и его корни уходят далеко в прошлое, конкретно начиная с 2009 года. Эта интегрированная система играла ключевую роль в формировании множества исследовательских публикаций. Кроме того, благодаря ей было подготовлено множество важных материалов, которые использовались в различных национальных и международных проектах.

В представленном отчете подробно рассматриваются различные стратегии и меры, направленные на достижение углеродной нейтральности в критически важной отрасли — энергопроизводстве. Для обеспечения всестороннего анализа и оценки потенциальных путей развития этой области были выделены два ключевых сценария: базовый сценарий, который представляет собой прогноз развития с учетом текущих тенденций, и климатический сценарий, который учитывает активные меры по снижению выбросов углекислого газа и других парниковых газов. Оба этих сценария были разработаны исходя из детального анализа доступных данных и показателей. Они предоставляют ценную информацию о возможных путях и методиках, которые могут быть использованы для достижения желаемых результатов. Прогнозный период, который был взят в качестве основы для разработки этих сценариев, охватывает временной промежуток до 2060 года, что позволяет оценить долгосрочные последствия и возможные изменения в энергопроизводстве на протяжении нескольких десятилетий.

Исследование, активно сосредоточенное на процессах декарбонизации, не только наглядно продемонстрировало реальные шансы для значительного снижения уровней выбросов парниковых газов, но и подчеркнуло специфические, эффективные методы достижения этой цели. Один из наиболее важных и перспективных факторов, который был выявлен в ходе исследования, — это активное и широкомасштабное внедрение чистых и возобновляемых источников энергии. Эти источники не только представляют собой альтернативу углеводородам, но и обеспечивают экологически чистое производство энергии без

вредных выбросов. Кроме того, исследование также подсветило различные альтернативные решения и инновационные технологии, которые могут служить заменой традиционным источникам энергии, таким как уголь и нефть, что в свою очередь может стать ключевым фактором в борьбе с изменением климата.

Другой критически важный компонент стратегического подхода к управлению энергией — это повышение энергоэффективности на всех этапах системы производства и потребления энергетических ресурсов. При этом речь идет не только о разработке, создании и внедрении новых, более эффективных с точки зрения энергопотребления технологий. Также важно пересмотреть и оптимизировать уже действующие процессы и методы работы. Этот процесс совершенствования и инноваций может дать ощутимый результат в виде уменьшения энергетических потерь, что, в свою очередь, приведет к более экономичной и рациональной работе системы в целом. Кроме того, такой подход делает систему менее уязвимой к различным внешним воздействиям, будь то экономические колебания или изменения климата.

Кроме того, электрификация различных процессов и индустрий играет неоценимую роль в переходе к углеродной нейтральности. В современном мире множество процессов, начиная от промышленных и заканчивая бытовыми, претерпевают изменения благодаря применению электрических технологий. Замена старых и устаревших систем на основе сгорания на современные электрические аналоги, особенно в тех областях, где это технологически выполнимо и экономически выгодно, может оказать колоссальное воздействие на сокращение выбросов вредных веществ в атмосферу, включая парниковые газы. Таким образом, активное продвижение электрификации может стать одним из ключевых инструментов в борьбе за экологическую безопасность и стабильность нашей планеты.

Основные конкретные методики и подходы, направленные на снижение выбросов парниковых газов, в особенности применяемые в рамках энергетических секторов, включают в себя целый ряд действий. Во-первых, речь идет о введении мер финансовой и налоговой политики, которые стимулируют снижение антропогенных выбросов парниковых газов, особенно в углеродоемких отраслях экономики. Это может включать в себя льготы, субсидии или экологические налоги.

Финансовая и налоговая политика играют ключевую роль в декарбонизации экономики. Декарбонизация означает переход от углеродоемкой экономики к экономике с низким уровнем углерода, что поможет бороться с изменением климата и сократить выбросы парниковых газов. Для достижения этой цели финансовая политика может предложить ряд мер, включая инвестирование в зеленые технологии и инновации, предоставление субсидий для разработки и внедрения безуглеродных технологий и прямое финансирование исследований в области устойчивой энергетики. Эти меры могут стимулировать частный сектор вкладывать в экологически чистые решения и ускорять темпы энергоперехода. Налоговая политика может включать в себя налогообложение выбросов углекислого газа, что делает загрязнение более дорогостоящим и мотивирует

компании искать альтернативные, более экологичные пути производства. Экологические налоги и льготы могут также стимулировать потребителей выбирать товары и услуги, которые произведены с меньшим углеродным следом. Грамотно разработанная финансовая и налоговая политика могут быть мощными инструментами в борьбе с климатическими изменениями, создавая экономические стимулы для декарбонизации и поддерживая развитие устойчивых технологий.

Во-вторых, государственные органы могут оказывать меры поддержки в отношении внедрения, тиражирования и масштабного распространения безуглеродных и низкоуглеродных технологий. Это подразумевает не только научные исследования, но и практическое применение новых методов в производстве.

Государственные органы играют центральную роль в процессе декарбонизации экономики, активизируя внедрение и распространение безуглеродных и низкоуглеродных технологий. Это становится возможным благодаря ряду стратегий и действий. Правительство может выделить значительные бюджетные ресурсы на исследования и разработку новых технологий, чтобы стимулировать научные прорывы в области устойчивой энергетики. Инновации в этой области могут привести к созданию новых решений, которые будут более доступными и эффективными для массового применения. Государство может предоставлять экономические стимулы, такие как субсидии или налоговые льготы, компаниям, которые вкладываются в разработку и внедрение безуглеродных решений. Это делает экологически чистые технологии более привлекательными для бизнеса. Важным аспектом является сотрудничество между государством и частным сектором. Путем создания партнерских отношений и объединения усилий правительства могут ускорить процесс масштабирования и распространения инновационных решений. Также важно, что государственное регулирование и поддержка могут значительно ускорить переход к устойчивому энергообеспечению, создавая благоприятные условия для внедрения и распространения безуглеродных технологий.

В-третьих, изменение налоговой, таможенной и бюджетной политики может быть направлено на учет вызовов развития с низким уровнем выбросов парниковых газов. Это также включает учет потенциальных последствий для баланса парниковых газов при планировании и осуществлении бюджетных расходов и инвестиций.

Изменение налоговой, таможенной и бюджетной политики в ответ на вызовы, связанные с изменением климата, стоит в центре усилий многих государств в борьбе с глобальным потеплением. Учитывая важность снижения выбросов парниковых газов, правительства активно внедряют налоговые стимулы для предприятий и индивидов, которые принимают углеродосберегающие решения. Это может включать в себя налоговые льготы для зеленых технологий, налоги на углерод и другие меры, которые делают загрязнение менее выгодным экономически. С точки зрения таможенной политики, пошлины и квоты могут быть пересмотрены таким образом, чтобы поддерживать ввоз и продажу экологически чистых товаров и технологий. Это стимулирует международную торговлю

товарами, которые способствуют устойчивому развитию. Что касается бюджетной политики, учет вызовов развития с низким уровнем выбросов парниковых газов означает, что правительства включают экологические соображения в свои бюджетные расходы и инвестиции. Например, вместо инвестирования в традиционные угольные станции, правительство может финансировать исследования и разработки в области возобновляемой энергетики. Это подход, который учитывает долгосрочные экологические и экономические последствия, обеспечивая устойчивое развитие для будущих поколений.

Кроме того, принятие отраслевых и региональных планов, а также установление конкретных целей для отраслей, позволит системно и целенаправленно работать над переходом на развитие с низким уровнем выбросов. Развитие системы публичной нефинансовой отчетности предприятий способствует повышению их прозрачности и ответственности в вопросах экологии. Принятие отраслевых и региональных планов становится ключевым элементом этого процесса. Эти планы не просто задают рамки, но и устанавливают конкретные цели для различных секторов экономики, что позволяет создать четкую дорожную карту для действий. Разработка таких планов помогает скоординировать усилия разных участников, от государственных органов до частных компаний. Это способствует созданию среды, в которой каждый участник знает свою роль и ответственность в достижении общей цели.

Система публичной нефинансовой отчетности становится незаменимым инструментом для предоставления информации об экологической ответственности компаний. Предоставление такой информации помогает заинтересованным сторонам, включая инвесторов, партнеров и потребителей, оценить усилия компании в области устойчивости. Благодаря этому компании становятся более прозрачными, а их деятельность — предсказуемой и открытой для контроля.

Сочетание стратегического планирования на уровне отраслей и регионов с улучшением системы отчетности предприятий создает благоприятные условия для целенаправленного и системного перехода к экономике с низким уровнем выбросов.

Повышение энергетической и экологической эффективности в различных секторах экономики, а также стимулирование использования вторичных энергетических ресурсов в производстве, может значительно уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. Энергетическая и экологическая эффективность играют ключевую роль в современной экономике, ориентированной на устойчивость. Повышение этих показателей в различных отраслях позволяет делать бизнес более устойчивым и снижает его экологический след. Эффективное использование ресурсов означает получение большего объема продукции при меньших затратах энергии. Это приводит к сокращению выбросов парниковых газов, уменьшению загрязнения окружающей среды и снижению зависимости от невозобновляемых источников энергии.

Использование вторичных энергетических ресурсов, таких как отходы производства или отработанные материалы, также имеет большой потенциал для уменьшения экологического воздействия. Эти ресурсы часто уходят на свалки или

уничтожаются, в то время как их можно было бы преобразовать в ценную энергию или сырье для производства. Их использование помогает сократить потребность в добыче нового сырья, уменьшает объем отходов и может даже привести к снижению производственных затрат.

Комбинация энергетической и экологической эффективности с активным использованием вторичных ресурсов может стать ключом к созданию экономики, которая обеспечивает процветание без ущерба для планеты.

Разработка механизмов стимулирования энергосбережения и применения новейших технологий становится одним из главных приоритетов для современных государств, стремящихся к устойчивому развитию. Эти механизмы могут представлять собой комплекс мер, включая экономические стимулы, законодательные инициативы и образовательные программы, направленные на создание культуры энергосбережения среди населения и предприятий.

Применение новейших технологий не только помогает оптимизировать потребление энергии, но и открывает двери для инновационных решений, которые могут радикально изменить способы производства и потребления энергии. Интеграция таких технологий может привести к созданию более чистых и эффективных систем энергоснабжения.

Поощрение национального научного и инженерного потенциала также играет критически важную роль. Инвестирование в образование, исследования и разработки в области энергетики может стимулировать отечественные инновации, создавая тем самым конкурентоспособные решения на мировом рынке.

В целом, сочетание этих стратегий создает основу для успешного энергоперехода. Такой переход позволит не только обеспечить энергетическую безопасность, но и значительно снизить воздействие на климат, сокращая выбросы парниковых газов и минимизируя негативное воздействие на окружающую среду. В долгосрочной перспективе это будет способствовать созданию устойчивой экосистемы, в которой экономическое процветание сочетается с экологической ответственностью.

Большую роль в долгосрочном низкоуглеродном развитии играет научно-техническое изыскание. В мире, где экологическая ответственность и устойчивость становятся ключевыми факторами для экономического роста, возможность использовать новые технологии для минимизации воздействия на окружающую среду становится основой прогресса.

На сегодняшний день многие научно-технические изыскания в сфере низкоуглеродного развития находятся на начальном этапе. Однако даже на этой ранней стадии видны потенциальные перспективы их применения. Новые методы производства, использования энергии и утилизации отходов могут радикально изменить промышленный ландшафт, делая его менее зависимым от ископаемых видов топлива и более дружелюбным к окружающей среде.

Однако для того, чтобы эти технологии стали реальностью, необходимо значительное инвестирование в научные исследования и разработки. Это требует не только финансовых ресурсов, но и кадрового потенциала. Подготовка специалистов, способных работать на переднем крае научно-технического

прогресса, становится одним из ключевых аспектов обеспечения будущего низкоуглеродного развития.

Профессиональное образование и повышение квалификации играют в этом процессе центральную роль. Вузы и научные институты могут стать инкубаторами новых идей, предоставляя платформу для экспериментов, исследований и разработки новых технологий. Сотрудничество между академическими кругами, промышленностью и государственными учреждениями может стимулировать инновационную деятельность, создавая условия для коммерциализации научных разработок.

Также важно учитывать социальный аспект. Принятие новых технологий часто требует изменения восприятия и поведения общества. Образовательные и просветительские программы могут помочь формировать культуру устойчивости среди населения, делая людей более осведомленными о преимуществах и возможностях низкоуглеродного развития.

Если говорить о конкретных технологиях, то, например, разработка более эффективных методов хранения энергии может решить проблему непостоянства ветровой и солнечной энергетики. Новые материалы могут сделать процесс производства менее энергоемким и уменьшить объем отходов. А инновации в транспортной отрасли могут привести к сокращению выбросов и созданию более чистых и эффективных транспортных средств.

Тем не менее, научно-технические изыскания требуют времени, чтобы дать реальные результаты. Важно понимать, что национальный научный и инженерный потенциал становится ключевым ресурсом для любой страны, стремящейся к лидерству в долгосрочном низкоуглеродном развитии.

Атомная энергетика, несмотря на различные дебаты вокруг неё, играет ключевую роль в глобальных усилиях по снижению выбросов парниковых газов и борьбе с изменением климата. Понимание этой роли в долгосрочной перспективе требует всестороннего рассмотрения вклада ядерной энергии в мировую энергетическую систему.

С начала промышленного использования атомной энергии в 1950-х годах она стала важным источником электроэнергии для многих стран. Основное преимущество атомной энергии заключается в том, что при её получении не происходит прямых выбросов углекислого газа.

По мере углубления проблемы глобального потепления важность безуглеродных источников энергии только увеличивается. В то время как возобновляемые источники энергии, такие как солнечная и ветровая, являются ключевыми элементами устойчивой энергетической системы, атомная энергия может служить стабильным и надежным источником электроэнергии, дополняя эти переменные источники.

Одним из важнейших аспектов атомной энергетики является её способность обеспечивать постоянное электроснабжение. Это особенно важно для индустриализированных стран с высоким уровнем потребления электроэнергии. В то время как ветровые и солнечные станции могут зависеть от погодных условий,

атомные электростанции работают круглосуточно, обеспечивая стабильность электросети.

Современные технологии и строгие международные стандарты безопасности делают ядерные станции более безопасными. Разработка новых типов реакторов, таких как быстрые реакторы и ториевые реакторы, может ещё больше уменьшить риски и сделать атомную энергетику более устойчивой.

С учетом необходимости снижения выбросов углекислого газа и ограничения глобального потепления атомная энергетика может стать одним из ключевых инструментов в достижении этих целей.

Поддержка общественности также играет важную роль. Прозрачность, образование и диалог с гражданами помогут создать благоприятную среду для развития атомной энергетики как одного из ключевых элементов борьбы с изменением климата.

В завершение, атомная энергетика имеет потенциал стать важным столпом устойчивой энергетической системы в будущем. При правильном подходе и с учетом всех аспектов безопасности она может внести значительный вклад в борьбу с глобальным потеплением.

Другой вид чистой энергии, термоядерная энергия. Термоядерная энергия представляет собой одну из самых обещающих и интригующих перспектив в области энергетики. Если ученые и инженеры смогут разработать устойчивые и экономически эффективные методы контролируемого термоядерного синтеза, это может кардинально изменить ландшафт мировой энергетики.

Основное преимущество термоядерной энергии заключается в ее потенциальной способности обеспечивать огромные количества чистой энергии с минимальными экологическими последствиями. В отличие от классической ядерной энергетики, термоядерный синтез не производит радиоактивных отходов с длительным периодом полураспада. Кроме того, основным топливом для термоядерного реактора может стать изотоп водорода - триций, который можно получать из лития, ресурсы которого на Земле обширны.

Однако реализация термоядерного синтеза на практике сталкивается с множеством научных и инженерных проблем. Одной из главных является необходимость поддержания экстремально высоких температур для начала реакции синтеза, что требует сложных технологических решений.

Несмотря на эти трудности, последние исследования и эксперименты, такие как проект ITER в Европе, показывают определенные успехи в направлении создания работоспособного термоядерного реактора. Если такой реактор станет реальностью, он может стать источником практически неограниченной энергии без выбросов углекислого газа.

Перспективы термоядерной энергетики в будущем велики. Она имеет потенциал стать решением многих энергетических и экологических проблем современного мира. Однако успешное внедрение этой технологии требует значительных инвестиций в научные исследования и разработки, а также международного сотрудничества в области ядерной безопасности и разделения технологий.

Технологии прямого улавливания углерода из атмосферы стали в последние годы одним из актуальных направлений в борьбе с климатическими изменениями. Эти технологии позволяют извлекать углекислый газ прямо из воздуха и либо хранить его, либо использовать для других целей, таких как производство топлива или других химических веществ.

Для такой страны как Республика Казахстан, с его обширными природными ресурсами и активно развивающейся промышленностью, использование технологий улавливания углерода может представлять особый интерес. Во-первых, Республике Казахстан важно снизить свои выбросы углекислого газа в свете глобальных договоренностей по климату. Технологии прямого улавливания углерода могут стать одним из инструментов достижения этой цели.

У Республики Казахстан есть значительные резервы подземных пород, которые могут быть использованы для безопасного хранения углекислого газа после его извлечения из атмосферы. Это создает возможность для страны стать лидером в области хранения и утилизации углекислого газа на региональном и возможно глобальном уровне.

Также, учитывая стратегическое географическое положение Республики Казахстан и его амбиции стать ключевым игроком в области возобновляемой энергетики, можно рассматривать технологии улавливания углерода как дополнение к стратегии развития зеленой энергетики. В целом, для Республики Казахстан технологии прямого улавливания углерода могут предложить не только способ снижения воздействия на климат, но и новые экономические возможности в области углеродной экономики.

Таким образом, страна стоит перед необходимостью комплексного подхода к решению вопроса углеродной нейтральности. Этот подход предполагает полный переход на чистые и возобновляемые источники энергии, что становится все более актуальным в современном мире, где важно обеспечение экологической безопасности и сохранение ресурсов планеты. Кроме того, необходимо акцентировать внимание на повышении энергоэффективности различных производственных и бытовых процессов. Широкая электрификация, в свою очередь, помогает снизить зависимость от ископаемых источников топлива и уменьшить выбросы углекислого газа.

Исследования в данной области однозначно подтверждают эффективность такого комплексного подхода. Научные данные указывают на то, что стремление к углеродной нейтральности не только возможно, но и абсолютно достижимо при правильной стратегии и последовательных действиях. Важно также отметить, что данное исследование выявляет ключевые направления, которым стоит уделить особое внимание при дальнейшей работе в данном направлении. Необходима дополнительная активность в научных и практических аспектах для обеспечения лучших результатов в стремлении к углеродной нейтральности.

4. Список использованной литературы

[1] Altdorfer, F., (1981), "Introduction of price elasticities on energy demand in MARKAL", Memorandum No 345, KFA, Julich, July 1981.

[2] Berger, C., R. Dubois, A. Haurie, E. Lessard, R. Loulou, and J.-Ph. Waaub (1992), "Canadian MARKAL: an Advanced Linear Programming System for Energy and Environment Modelling", INFOR, Vol. 20, 114-125, 1992.

[3] Brooke, A, D. Kendrick, A. Meeraus, and R. Raman, 1998, The Solver Manual of the GAMS: A USER'S GUIDE, December 1998.

[4] Chen, K., M. Crucini (2012), "Comparing General and Partial Equilibrium Approaches to the Study of Real Business Cycles", Vanderbilt University Research paper, June 2012 (kan.chen@vanderbilt.edu, mario.crucini@vanderbilt.edu)

[5] Dantzig, G.B. (1963), Linear programming and Extensions, Princeton University Press, Princeton, New-Jersey, 1963.

[6] European Commission, The GEM-E3 Model, General Equilibrium Model for Economy, Energy and Environment, https://ec.europa.eu/jrc/en/gem-e3/model.

[7] G. Goldstein, G., 1991, "PC-MARKAL and the MARKAL User's Support System (MUSS)", BNL 46319, April 1991

[8] IPCC, 2007, Climate Change, Fourth Assessment Report, WG III: Mitigation, B. Metz, O. Davidson, P. Bosch, R. Dave, L. Meyer, editors, Cambridge: Cambridge.

[9] Kanudia, A., R. Gerboni, R. Loulou, M. Gargiulo, M. Labriet, E. Lavagno, R. De Miglio, L.Schranz, G. C. Tosato, "Modelling EU-GCC energy systems and trade corridors: Long term sustainable, clean and secure scenarios", International Journal of Energy Management, 7, 2, 2013, 243 – 268.

[10] Loulou, R., and A. Kanudia (1999), "Minimax Regret Strategies for Greenhouse Gas Abatement: Methodology and Application", Operations Research Letters, 25, 219-230, 1999.

[11] Brown, T., Hörsch, J., & Schlachtberger, D. (2018, January 16). PyPSA: Python for Power System Analysis. Journal of Open Research Software; Ubiquity Press. https://doi.org/10.5334/jors.188.

[12] Victoria, M., Zhu, K., Brown, T., Andresen, G. B., & Greiner, M. (2020). Early decarbonisation of the European energy system pays off. Nature Communications; Nature Portfolio.https://doi.org/10.1038/s41467-020-20015-4.

[13] Zeyen, E., Hagenmeyer, V., & Brown, T. (2021). Mitigating heat demand peaks in buildings in a highly renewable European energy system. Energy; Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120784.

[14] Glaum, P. (2022). Enhancing the German Transmission Grid through Dynamic Line Rating. arXiv.org. https://arxiv.org/abs/2208.04716.

[15] Parzen, M., Abdel-Khalek, H., Fedotova, E. V., Mahmood, M., Frysztacki, M., Hampp, J., Franken, L., Schumm, L., Neumann, F., Poli, D., Kiprakis, A., & Fioriti, D. (2023, July 1). PyPSA-Earth. A new global open energy system optimization model demonstrated in Africa. Applied Energy; Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121096.

[16] Dantzig, G.B. (1963), Linear programming and Extensions, Princeton University Press, Princeton, New-Jersey, 1963.

[17] G. Goldstein, G., 1991, “PC-MARKAL and the MARKAL User’s Support System (MUSS)”, BNL 46319, April 1991
[18] Kanudia,, Gerboni, Loulou, Gargulio, Labriet, Lavagno, De Miglio, Tosato, “Modelling EU-GCC energy systems and trade corridors: Long term sustainable, clean and secure scenarios”, International Journal of Energy Management, 7, 2, 2013, 243 – 268.
[19] Victoria, M., Zhu, K., Brown, T., Andresen, G. B., & Greiner, M. (2020). Early decarbonisation of the European energy system pays off. Nature Communications; Nature Portfolio.https://doi.org/10.1038/s41467-020-20015-4.
[20] Zeyen, E., Hagenmeyer, V., & Brown, T. (2021). Mitigating heat demand peaks in buildings in a highly renewable European energy system. Energy; Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120784.
[21] Glaum, P. (2022). Enhancing the German Transmission Grid through Dynamic Line Rating. arXiv.org. https://arxiv.org/abs/2208.04716.
[22] C. Delmastro, Buildings Sectorial Overview, The International Energy Agency (2022), https://www.iea.org/reports/buildings
[23] Programme UNE 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector, https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction (2022)
[24] P. Berrill, E.J.H. Wilson, J.L. Reyna, A.D. Fontanini, E.G. Hertwich, Decarbonization pathways for the residential sector in the United States, Nat Climate Change, 12 (2022), pp. 712-718
[25] X. Zhong, M. Hu, S. Deetman, B. Steubing, H.X. Lin, G.A. Hernandez, et al., Global greenhouse gas emissions from residential and commercial building materials and mitigation strategies to 2060, Nat Commun, 12 (2021), p. 6126
[26] Mohan, O. Geden, M. Fridahl, H.J. Buck, G.P. Peters, UNFCCC must confront the political economy of net-negative emissions, One Earth, 4 (2021), pp. 1348-1351
[27] F. Creutzig, L. Niamir, X. Bai, M. Callaghan, J. Cullen, J. Díaz-José, et al., Demand-side solutions to climate change mitigation consistent with high levels of well-being, Nat Climate Change, 12 (2022), pp. 36-46
[28] Y. Wolde-Rufael, S. Idowu, Income distribution and CO2 emission: a comparative analysis for China and India, Renew Sustain Energy Rev, 74 (2017), pp. 1336-1345
[29] K.C. Seto, S.J. Davis, R.B. Mitchell, E.C. Stokes, G. Unruh, D. Ürge-Vorsatz, Carbon lock-in: types, causes, and policy implications, Annu Rev Env Resour, 41 (2016), pp. 425-452
[30] B.D. Leibowicz, C.M. Lanham, M.T. Brozynski, J.R. Vázquez-Canteli, N.C. Castejón, Z. Nagy, Optimal decarbonization pathways for urban residential building energy services, Appl Energy, 230 (2018), pp. 1311-1325
[31] L.G. Swan, V.I. Ugursal, Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: a review of modeling techniques, Renew Sustain Energy Rev, 13 (2009), pp. 1819-1835

[32] S. de la Rue du Can, V. Letschert, M. McNeil, N. Zhou, J. Sathaye, Residential and transport energy use in India: Past trend and future outlook, Lawrence Berkeley National Lab, https://www.osti.gov/servlets/purl/951788 (2009)
[33] Walia, T. Tathagat, N. Dhingra, P. Varma, A residential end use energy consumption and appliance ownership patterns in India, Energy Efficiency Domestic Appliances Light (2022), pp. 67-79
[34] Avelino, 2017, Power in sustainability transitions: Analysing power and (dis) empowerment in transformative change towards sustainability, Environmental Policy and Governance, 27 (2017), pp. 505-520
[35] D. Béland, Ideas, institutions, and policy change, Journal of European Public Policy, 16 (2009), pp. 701-718
[36] L.E. Bontje, S.L. Gomes, Z. Wang, J.H. Slinger, A narrative perspective on institutional work in environmental governance–insights from a beach nourishment case study in Sweden, Journal of Environmental Planning and Management, 62 (2019), pp. 30-50
[37] M.C. Brisbois, Powershifts: A framework for assessing the growing impact of decentralized ownership of energy transitions on political decision-making, Energy Research & Social Science, 50 (2019), pp. 151-161
[38] Казэнерджи, «Национальный энергетический отчет», 2021 г., https://www.kazenergy.com/ru/operation/ned/2117/;
[39] Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 года № 121 «Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года», https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121;