

РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ВОСПРОИЗВОДСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

DOI: 10.36535/0235-5019-2020-02-4

УДК 502:171

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КРИВОЙ РАНЖИРОВАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ТОПЛИВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ГЕРМАНИИ

Tobias Hünter*, Anika Regett, Steffen Fattler, Andrej Guminski,
Simon Pichlmaier, Jochen Conrad, Serafin von Roon

*13-я Международная конференция по экономике энергетики и технологиям
(Дрезденский технический университет), 2019*

Исследовательский центр по экономике энергетики, Мюнхен, Германия

APPLICATION-SIDE MERIT-ORDER-CURVES FOR SYNTHETIC FUELS IN THE GERMAN ENERGY SYSTEM

*13th International Conference on Energy Economics and Technology (TU Dresden),
2019 г.*

** Forschungsgessellschaft für Energiewirtschaft (FfE), Munich, Germany,
thuebner@ffe.de*

Резюме

Сценарии политики Германии в области энергетики и климата предполагают, что к 2050 г. использование синтетических топлив будет значительно возрастать с ростом уровня устремлений по защите климата. В сценариях синтетические топлива используются также в применениях, в которых с точки зрения нынешних перспектив, будет возможна и электрификация в 2050 г. Действительно синтетические топлива используются также в областях, для которых имеются адекватные альтернативы топливу в виде возобновляемой энергии. Использован статический анализ на основе модели для создания кривых ранжирования для практического применения синтетических топлив с целью сравнения с традиционными ископаемыми топливами, а также с применениями электрификации. Это даст возможность провести начальную оценку реального экономически эффективного использования синтетических топлив.

Анализ показывает, что с учетом нынешних тенденций цен на энергоресурсы для временного горизонта до 2050 г. синтетические топлива не будут экономически обоснованным вариантом, по сравнению с традиционными ископаемыми топливами. Однако сочетание синтетических топлив с высокоэффективными технологиями типа топливных элементов даст ценовые преимущества по сравнению с альтернативами в виде традиционных ископаемых топлив. Это можно наблюдать особенно в части транспортного сектора, в котором синтетические

топлива могут оказать содействие экономической оптимальной стратегии снижения потребления ископаемых топлив. Однако при использовании синтетических топлив по сравнению с традиционной альтернативой появятся дополнительные затраты порядка 48 млрд. евро. Эти дополнительные затраты в 2 раза превышают субсидии, выделяемые в Германии в 2018 г. в соответствии Законом о возобновляемых источниках энергии. Если синтетические топлива и электрификацию сравнить с точки зрения defossilization (снижения потребления ископаемых топлив)¹, становится ясно, что имеются области, в которых синтетические топлива предпочтительнее для электрификации, с затратной точки зрения. В особенности в транспортном секторе имеются применения на основе синтетического топлива, которые можно экономически эффективно использовать для снижения потребления ископаемых топлив в энергетической системе. Кроме того, литературный обзор показал, что имеется 28% применений, когда технологии не апробированы, и может быть идентифицирован эффективный вариант электрификации для снижения потребления ископаемых топлив в энергетической системе. В транспортном секторе, в частности имеются применения на основе синтетического топлива, которые можно экономически эффективно использовать для снижения потребления ископаемых топлив в энергетической системе. Результатом применений с учетом количественно определенных затрат станут дополнительные затраты величиной 22 млрд. евро для использования синтетического топлива, по сравнению с электрификацией.

1. Мотивация

Анализ сценариев политики в области энергетики и климата показал, что ожидается расширенное использование синтетических топлив к 2050 г. в случае высокого уровня устремлений по защите климата ([1], [2], [3], [4], [5]). Только электрификации и реализации дополнительных мер по эффективности и обеспеченности будет недостаточно для достижения масштабных климатических целей ([6], [7]). Кроме того, доля кратковременных и сезонных флуктуаций энергии будет продолжать возрастать в свете Парижского соглашения по климату и решений, ориентированных на его выполнение, принятых на Климатическом саммите в Катовице². Временно это может привести к значительной остаточной нагрузке в энергетической системе, в периоды высокого спроса и низкой доли источников возобновляемой энергии ([8], [7], [9], [10]). Помимо снижения выбросов парниковых газов (ПГ), использование синтетических топлив обеспечивает кратко- и долговременную гибкость в энергетической системе, а также использование существующей инфраструктуры и торговых сетей ([11], [12], [13], [14], [7]). Однако в сложившихся условиях использование синтетических топлив вызывает риск неэффективности энергетической системы, при их возможном применении, хотя имеются более дешевые и более эффективные альтернативные меры для снижения выбросов ПГ. Помимо этого, если спрос на синтетическое топливо не

¹ Термин используется вместо декарбонизации (снижения углеродоемкости), поскольку декарбонизация должна исключать использование углеродсодержащих топлив для производства электроэнергии.

² Климатический саммит в Катовице в декабре 2018 г., на котором была принята “дорожная карта” реализации Парижского соглашения по климату 2015 г.

будет полностью покрыт в Германии, появится зависимость от источника энергии за рубежом. Вследствие отсутствия альтернатив, использование синтетических топлив ожидается главным образом в транспортном и промышленном секторе ([1], [15]). В транспортном секторе это в особенности относится к применениям, которые трудно или исходя из современной технологической перспективы невозможно электрифицировать, таким как грузовой автомобильный транспорт, перевозки судами и авиационный транспорт. В промышленности ориентация на применения в таких отраслях, как *черная металлургия* и *производство основных химических веществ*, в которых электрификация оказывается дорогостоящей или технически проблемной, и энергоносители на ископаемом топливе используются в качестве сырья ([16], [17]).

Сообщаемые в настоящее время кривые затрат для снижения выбросов ПГ не ориентированы на использование синтетических топлив [3], и в таком случае уровень детализации данных о синтетическом топливе низкий. Так как внедрение синтетических топлив часто не является самым эффективным вариантом уменьшения использования ископаемых топлив для энергетической системы, альтернативные меры с использованием возобновляемой энергии должны быть включены в процесс принятия решений. При рассмотрении возможностей делается акцент на то, какие мероприятия с синтетическими топливами необходимы, и в каких областях применения, с точки зрения выбросов ПГ, и в каких областях уменьшение использования ископаемых топлив уже будет более экономически эффективно с применением мер электрификации. Помимо неэффективности, которая может стать результатом выбора меры по снижению выбросов ПГ в индивидуальных применениях, следует определить также дополнительные затраты, которые являются результатом использования синтетических топлив, по сравнению с традиционными топливами. В результате этого дополнительные затраты в энергетическом повороте³ можно зафиксировать при использовании синтетических топлив по сравнению с нынешними традиционными технологиями [18].

2. Методологическая процедура

Для анализа использования синтетических топлив в энергетической системе Германии были составлены межотраслевые статические кривые ранжирования с временным горизонтом до 2050 г. Разработаны две стратегии исследования. С одной стороны, использование синтетического топлива сравнивали с применениями на основе ископаемых топлив в порядке ранжирования. С другой стороны, при возможности идентифицировали электрические альтернативы и сравнивали с подачей синтетического топлива в рамках анализа дифференциальных затрат⁴ как аспекта затрат. При 100% выработки электроэнергии из возобновляемых источников ожидается, что сравнение синтетических топлив и электрификации в обоих случаях приведет к почти полному снижению выбросов в энергетической системе. Следующий анализ сосредоточен на частных домовладениях, транспортном и промышленном секторе, без рассмотрения использования синтетических топлив в

³ Под энергетическим поворотом понимается взятый правительством Германии курс на постепенный отказ от углеводородной и ядерной энергетики и почти полный переход на ее возобновляемые источники.

⁴ Дифференциальные затраты – величина, на которую отличаются затраты при рассмотрении двух альтернативных решений.

секторе электроэнергетики. Это связано главным образом с тем фактом, что источники возобновляемой энергии рассматриваются как экономически осуществимый вариант для уменьшения использования ископаемых топлив в секторе электроэнергетики, исходя из предположения, что требуемая гибкость в энергетической системе может быть обеспечена со стороны потребителя, например, промышленная гибкость или зарядка автомобилей.

Методологический подход можно разделить на пять частей, как показано на рис. 2-1.

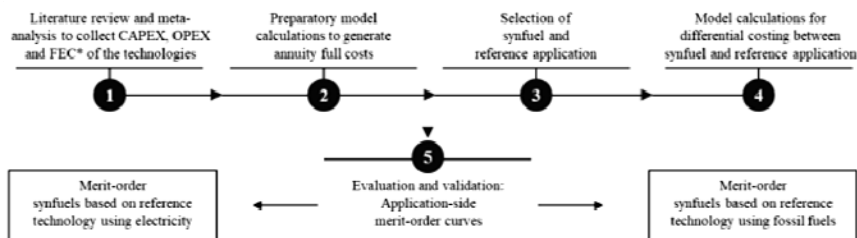


Рис. 2-1. Обзор пяти основных компонентов методологической процедуры

Пояснения к рисунку: Literature review and meta-analysis to collect CAPEX, OPEX and FEC* of the technologies – литературный обзор и мета-анализ для сбора данных о капитальных затратах, эксплуатационных затратах и полных издержках технологий, Preparatory model calculations to generate annuity full costs – подготовительная модель расчетов для определения полной стоимости аннуитета⁵, Selection of synfuel and reference applications – выбор синтетического топлива и сравнительных применений, Model calculations for differential costing between synfuel and reference application – модель расчетов для дифференциального учета затрат между синтетическим топливом и сравнительным применением, Merit-order synfuels based on reference technology using electricity – ранжирование синтетических топлив на основе сравнительной технологии с использованием электроэнергии, Evaluation and validation: Application-side merit-order curves – оценка и подтверждение кривой ранжирования для практического применения, Merit-order synfuels based on reference technology using fossil fuels – ранжирование синтетических топлив на основе сравнительной технологии с использованием ископаемых топлив

На первом этапе данные, которые требуются для построения межотраслевых кривых ранжирования, собирались с помощью литературного обзора и мета-анализа⁶ (1). В результате были идентифицированы технологии синтетических топлив и соответствующих сравнительных технологий и зарегистрированы их капитальные затраты (CAPEX) и эксплуатационные затраты (OPEX). Кроме того, было определено конечное потребление ископаемых топлив для энергетических целей сравнительной технологии. Результаты этого литературного анализа уже были опубликованы предварительно в нескольких публикациях, и они служили в качестве исходных данных в этом обсуждении. На втором этапе (2) проводились

⁵ Аннуитет – способ погашения кредита равными по величине периодическими платежами (обычно-ежемесячными).

⁶ Мета-анализ – объединение результатов нескольких исследований методами статистики для проверки одной или нескольких взаимосвязанных научных гипотез.

работы по предварительному моделированию для расчета аннуитета CAPEX и OPEX сравнительных технологий с помощью метода аннуитета с временным горизонтом до 2050 г. На третьем методологическом этапе были выбраны соответствующая технология замещения и сравнительная технология, которые сравниваются друг с другом. С одной стороны, имело место традиционное применение с использованием ископаемых топлив, с другой стороны, для сравнения использовали электрифицированное применение. В обоих случаях применение ископаемого топлива является технологией замещения. На четвертом этапе были выполнены требуемые модельные расчеты для дифференциального учета затрат между синтетическим топливом и сравнительным применением. И, наконец, была проведена оценка, подтверждение и передана для построения кривых ранжирования с помощью диаграмм Мекко⁷.

2.1. Сбор данных с помощью литературного обзора и мета-анализа

Для построения кривых ранжирования практического применения для синтетических топлив в энергетической системе Германии требуются исследование основного массива данных для технологических параметров и параметров потребления в соответствующих секторах выходной энергии. Это исследование данных не было проведено в рамках этой публикации. Для этой цели использовались секторные модели SorNA⁸ [19], TraM⁹ [20] и SmInd¹⁰ ([18], [21]). Требуемые полные затраты дифференцировались в соответствии с инвестициями и установленными эксплуатационными затратами, потреблением энергии, а также другими определенными параметрами секторных применений и их изменением до 2050 г., и они доступны во внутриотраслевых данных. Собранные данные по CAPEX включают инвестиционные затраты для нового, а также модернизируемого существующего оборудования. Потребление энергии в применениях составляет основу для расчета OPEX, которые зависят главным образом от цены энергоресурсов. Поэтому нынешние цены энергоресурсов, а также их будущее изменение должно быть установлено. Статические цены энергоресурсов рассчитывались с помощью метода расчета с модерированием “снизу-вверх” для сектора электроэнергетики.

В лежащем в основе сценарии моделирования секторов конечных потребителей энергии и цен на энергоресурсы не предполагались технологические прорывы, а скорее предвидится традиционное развитие без масштабных мер по защите климата. Системные динамические эффекты не были включены в анализ. Это означает, что изменение рыночного спроса на источники синтетической энергии не вызовет роста затрат на поставки электроэнергии или повышение цен на сами синтетические топлива. Кроме того, не рассматривается оптимизация сектора электроэнергетики. Последствия изменения системы, такого как соответствующее расширение инфраструктуры, не включены в анализ. Дополнительный доход за счет кратко- и долговременной гибкости и безопасности поставок также не рассматривается в анализе. Если не появятся дополнительные инвестиции от использования синтетических топлив в существующие применения, итоговые

⁷ Диаграмма, используемая для визуализации качественных данных по паре переменных. Это накопительные линейчатые диаграммы.

⁸ Секторная модель частных домовладений.

⁹ Транспортная модель.

¹⁰ Модель сектора промышленности.

удельные переменные издержки будут включать только эксплуатационные затраты. Для некоторых применений рассмотрено время освоения новой технологии для установления того, будут ли меняться капитальные затраты. Когда имеются трудности в оценке изменений инвестиционных затрат, связанных с применением, ожидается только небольшое воздействие на затраты, и можно пренебречь временем освоения новой техники ([22], [23]).

2.2. Подготовительная модель расчетов для определения полной стоимости аннуитета

В качестве основы для разработки технологии требуется модель расчетов индивидуальных секторов с временным горизонтом до 2050 г. Для этой цели использовали секторные модели SorNA [19], TraM [20] и SmInd [18], [21]. Секторные модели позволяют определить базовые инвестиции и постоянные эксплуатационные затраты, а также потребление энергии и внутриотраслевые параметры технологий. Во всех сравнениях использовали полные затраты на применения для проведения ранжирования синтетического топлива.

Для определения ранжирования при практическом применении для расчета капитальных затрат использовали полную стоимость аннуитета, которая включает инвестиции и постоянные эксплуатационные затраты. Аннуитет капитальных затрат рассчитывается следующим образом (уравнение 2-1):

$$a = C_0 \cdot af_{n,i} = C_0 \cdot \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad (2-1)$$

Здесь: a [евро/год] – аннуитет; C_0 [евро] – начальные инвестиции/постоянные эксплуатационные затраты; af [1/год] – коэффициент аннуитета¹¹; n [лет] – срок службы технологии; i [%] – размер процентной ставки

Для расчета капитальных затрат в дополнение к переменным эксплуатационным затратам и потреблению энергии в технологии требуются цены энергоресурсов. Они оцениваются с помощью отдельного процесса моделирования и также с временным горизонтом до 2050 г. (см. раздел 3.1). Дифференцированные капитальные затраты появляются главным образом из-за различия в ценах энергоресурсов и энергоэффективности применения синтетического топлива по сравнению с ископаемыми топливами или электрической альтернативой.

2.3. Выбор синтетического топлива и сравнительной технологии

Для построения кривых ранжирования практического применения необходимо сначала наметить сравнительные технологии. Применения, которые уже электрифицированы или в которых используются источники возобновляемой энергии, не включены в предмет этого анализа. Было проведено три различных анализа, которые подытожены в табл. 2-1.

¹¹ $a = P \times (1+P)^N / (1+P)^N - 1$, где: P – процентная ставка, выраженная в сотых долях в расчете на период, N – число периодов погашения кредита.

Обзор трех проанализированных случаев

	Энергоноситель замещающего применения	Энергоноситель сравнительного применения	Характеристики анализа
Случай 1	Синтетическое топливо	Традиционное ископаемое топливо	Без технологических изменений (ТС)
Случай 2	Синтетическое топливо	Традиционное ископаемое топливо	Без ТС, использование эффективной технологии для синтетического топлива
Случай 3	Синтетическое топливо	Электроэнергия	С ТС, эффективное синтетическое топливо сравнивается с электрифицированным применением на основе FEC, относящимся к традиционному применению

* Полные издержки технологии.

Прежде всего, применения с использованием традиционного ископаемого топлива сравниваются с применениями синтетического топлива. В этом случае использование синтетических топлив не требует каких-либо технологических изменений (Случай 1). Например, в транспортном секторе обычный бензин из ископаемого топлива замещается жидким бензином, получаемым с применением электроэнергии. Этот подход аналогично применяется к другим часто используемым энергоносителям типа дизельного топлива, природного газа, керосина и нефти. В секторе частных домовладений, а также в транспортном секторе использование синтетического топлива возможно почти для всех применений, без необходимости дополнительных технологических изменений. Напротив, только потребление газа с температурой выше 500°C в соответствии с распределением температуры согласно данным [23], используется для промышленных применений. Это можно объяснить с помощью двух следующих причин: с одной стороны, ожидается, что использование синтетических топлив станет важным для уменьшения применения ископаемых топлив в высокотемпературных промышленных процессах для поставки тепловой энергии вследствие отсутствия эффективных вариантов электрификации. Это применимо также к описанным ниже случаям. С другой стороны, для использования синтетических топлив требуются технологические изменения в промышленном секторе вследствие неоднородности большинства промышленных процессов. В этой первой форме практического применения кривой ранжирования, однако, анализируются только применения без технологических изменений.

Во втором случае также сравниваются традиционное ископаемое топливо и применения синтетического топлива (Случай 2). Однако в отличие от первого случая синтетические топлива применяются для технологий, позволяющих добиться большей эффективности. Для этой цели синтетические топлива применяются для более эффективного имеющегося технологического варианта. Например, используются топливные элементы вместо традиционных карбюраторных или дизельных двигателей в транспортном секторе. Еще одним

примером является замещение котлов на жидком топливе более эффективными котлами на газообразном топливе, в качестве которого применяется синтетический метан¹² вместо природного газа в секторе частных домовладений. Кроме того, применение синтетического топлива возможно в черной металлургии и в цементном производстве. Однако выбор более эффективной технологии по сравнению со Случаем 1, например, вследствие недостатка исходных данных, невозможен ни в одном применении. Для включения полного потребления энергии в исследованных секторах конечного потребления энергии, не проводилось изменения технологии для соответствующих внутриотраслевых применений. Вместо этого использовали вариант традиционного энергосистемателя на основе электроэнергии в рамках исходной технологии. Например, подобно первому случаю, в авиационных турбинах использовали синтетический авиационный керосин, полученный из диоксида углерода с применением электроэнергии вместо керосина на основе ископаемого топлива.

В третьем случае применение синтетического топлива сравнивается с вариантами электрификации. В качестве основы для конечного потребления энергии оно сравнивается с традиционным применением (Случай 3). Здесь остаются ранее выбранные более эффективные технологии синтетического топлива (Случай 2), такого типа как применения топливного элемента в транспортном секторе. Если это невозможно, используется иная альтернатива синтетического топлива. Например, это применяется для мотоциклов, когда использование топливного элемента недоступно. Кроме того, в некоторых случаях вообще отсутствует сравнительная технология с применением электрификации. Например, при рассмотрении подсектора авиационного транспорта с технологической точки зрения, не имеется эффективного способа для применений электрификации вследствие больших преодолеваемых расстояний. Тем не менее, для рассмотрения в целом применения энергии в случае практического применения кривой ранжирования не электрифицированные применения добавляются к левому краю ранжирования без определения их затрат. В третьем случае оба пути включают также трансформацию энергетической системы (связанную со снижением потребления ископаемых топлив). Если различие между электрической альтернативой и применением синтетического топлива представлено в порядке ранжирования, в рамках данных предположений, можно сделать вывод, что все меры, находящиеся ниже оси абсцисс, могут быть использованы для экономически эффективного снижения потребления ископаемых топлив в энергетической системе.

Возрастающее использование биомассы также не является также анализа, так как потенциал устойчивого применения биомассы, произведенной на территории страны, уже почти полностью использован¹³ [24], [25]. Вода и CO₂, которые необходимы главным образом как основные материалы для производства синтетических топлив, не имеют ограничивающего эффекта [25]. В исследовании также предполагается, что синтетические топлива производятся полностью с использованием возобновляемой энергии.

¹² Синтетический метан получают с помощью реакции метанирования, представляющей собой превращение оксида и диоксида углерода в метан.

¹³ Должен быть возможен межотраслевой сдвиг, но он не включен в данное рассмотрение.

2.4. Модель расчетов для построения кривых ранжирования для практического применения

Если применение синтетического топлива сравнивается с его альтернативами в виде ископаемого топлива или электроэнергии, компоненты затрат в кривых ранжирования являются результатом различий между обоими типами применений. В математических терминах это можно выразить следующим образом (уравнение 2-2):

$$\Delta \text{costs}_{\text{app}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{CAPEX}_{\text{syn},i} - \text{CAPEX}_{\text{ref},i}) + \sum_{j=1}^k (\text{OPEX}_{\text{syn},j} - \text{OPEX}_{\text{ref},j})}{\text{FEC}_{\text{conv,app}}} \quad (2-2)$$

Здесь: Δcosts [€/kWh]: удельная разность затрат [евро/кВтч], CAPEX [€] – капитальные затраты [евро], ref [dl]: показатель сравнительной технологии; dl – безразмерный, FEC [kWh]: конечное потребление энергии [кВтч], app [dl] – индекс применения, OPEX [€] – эксплуатационные затраты [евро], syn [dl] – индекс технологии с применением синтетического топлива, conv [dl] – индекс традиционной технологии

Итоговые различия в затратах объединены по секторам для каждого пятилетнего цикла в период с 2020 по 2050 гг. Впоследствии приоритетом стала разница в затратах, с использованием убывающего порядка от самой низкой до самой высокой пары применения. Для каждой пары в качестве основы брали конечное потребление энергии сравниваемого традиционного применения. В этом применении подытожены все моделируемые исходные параметры, что дало возможности для понимания и воспроизводства результатов моделирования, а также проведения дополнительного анализа чувствительности. В обоих случаях представлены удельное потребления энергии на функциональную единицу при традиционном использовании и удельные значения эксплуатационных и капитальных затрат модельных расчетов.

2.5. Оценка: практическое применение кривых ранжирования

Для построения кривых ранжирования в случаях практического применения оценивали расчетные данные, проверяли правдоподобие и делали заключительное подтверждение. Впоследствии результаты моделирования переводили в диаграммы Мекко (см. сноску 7).

В первых двух случаях для сравнения синтетического топлива и традиционных применений имеется два возможных результата. Либо традиционное применение дешевле по сравнению с синтетическим применением, либо наоборот (1 и 2). Результаты для Случая 1 представлены для 2020 и 2050 гг. С одной стороны, эта оценка может использоваться для демонстрации снижения цен на синтетическое топливо параллельно с непрерывным ростом цен на ископаемые топлива. С другой стороны, это отражается на росте общей эффективности в период с 2020 по 2050 гг. вследствие улучшений, относящихся к эффективности использования ресурсов, материалов и энергии. Результаты для Случая 2 показаны на кривых ранжирования только для 2050 г.

Напротив, при сравнении вариантов электрификации с использованием синтетических топлив можно выявить три различных результата: в случае мер электрификации снижение потребления ископаемых топлив будет экономически более эффективно, чем использование мер с синтетическим топливом, или наоборот

(1 и 2). Помимо этого, результаты могут указывать на отсутствие альтернативного технологически апробированного варианта электрификации для применений с уменьшенным использованием ископаемых топлив (3). В третьем случае аналогично второму случаю представлена только одна кривая ранжирования для 2050 г.

Так как в рамках исследования сделан анализ 52 различных применений, классификация применений на кривых ранжирования представлена с использованием метода аннотации¹⁴, как показано на рис. 2-2.

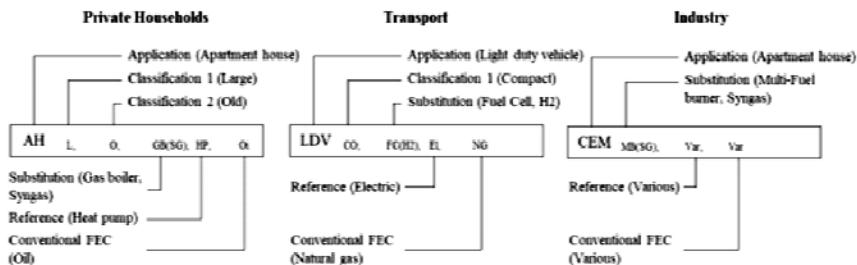


Рис. 2-2. Метод аннотации для практического применения кривых ранжирования

Пояснения к рисунку: Private Households – частные домовладения, Transport - транспорт, Industry- промышленность, Application (Apartment house) – применение (жилой дом), Classification 1 (Large) – классификация 1 (с большой площадью), Classification 2 (Old) – классификация 2 (старый дом), Application (Light duty vehicle) – применение (легковой автомобиль), Classification 1 (Compact) – классификация 1 (“компакт” – небольшого размера), Substitution (Fuel Cell, H₂) – замещение (топливный элемент, водород), Substitution (Multi-Fuel burner, Syngas) – замещение (мультитопливная горелка, синтетический газ), Substitution (Gas boiler, Syngas) – замещение (котел на газовом топливе, синтетический газ, Reference (Heat pump) – сравнительное применение (тепловой насос), Conventional FEC (Oil) – традиционный топливно-энергетический комплекс (жидкое топливо), Reference (Electric) – сравнительное применение (электроэнергия), Conventional FEC (Natural gas) – традиционный топливно-энергетический комплекс (природный газ), Reference (Various) – сравнительное применение (различное), Conventional FEC (Various) – конечное потребление традиционных видов энергии (различные виды), сокращения: AH – жилой дом, L – с большой площадью, O – старый, GB (SG) – котел на газовом топливе (синтетический газ), HP – тепловой насос, Oil – жидкое топливо, LDV – легковой автомобиль), FC (H₂) – топливный элемент (водород), EI - электропривод, NG – природный газ, CEM – цементная промышленность, MB (SG) – мультитопливная горелка (синтетический газ), Var - различный

Каждая аннотация включает сокращенное обозначение исследуемого применения (например, AH – жилой дом), а также до двух дополнительных классификаций, относящихся к данному применению. Например, в жилищном секторе жилые дома различаются с точки зрения их размера и класса возраста (классификация 1 и 2). В случаях, когда данное применение имеет только одну (см. транспорт) или не имеет дополнительной классификации (см. промышленность), пропущенные аббревиатуры вообще не упоминаются в

¹⁴ Аннотации – пометки, с помощью которых программист указывает компилятору Java (строго типизированный объектно-ориентированный язык программирования) и средствам разработки, что делать с участками кода помимо исполнения программы.

аннотации технологий. После классификации применений дается сокращение замещающей технологии, вместе с соответствующим источником энергии, указанным в скобках). Например, в промышленном секторе различные технологии сжигания заменяются мультиторпливной горелкой, в которой возможно использование синтетического метана.

После замещающей технологии перечисляется сравнительная технология. Например, при сравнении электрификации и синтетических топлив электропривод (EI) сравнивается с топливными элементами (FC) в транспортном секторе. И, наконец, приводится информация о случаях потребления традиционного применения энергии для сравнения между замещающим и сравнительным применением. Например, сравнение применения электрификации и использования синтетических топлив для легковых автомобилей класса “компакт” основано на конечном потреблении ископаемого топлива, относящемся к использованию “природного газа”. Изменение в потреблении традиционного источника энергии в связи с повышенной эффективностью одной из двух технологий не выявлено в статическом варианте ранжирования.

3. Моделируемые параметры

В этом разделе дается разъяснение об исходных параметрах моделирования для построения кривых ранжирования для практического применения в модели.

3.1. Затраты на энергоносители и CO₂

Эксплуатационные затраты применений определяются главным образом ценами энергоресурсов. Единицей измерения этих цен является евро/МВтч. Большая часть значений получена либо из внешних источников или основана на собственных оценках, как показано в табл. 7-1 в Приложении А. Затраты на районное теплоснабжение, обычную электроэнергию и обычный водород основаны на сценарии BAU (обычный порядок ведения бизнеса), разработанном в проекте Dynamis¹⁵ [27] и моделировались на линейной оптимизационной модели ISAaR [28]. Затраты на синтетическое топливо основаны на приведенном в литературе подходе приведенной стоимости “от частного к общему”, с предоставлением данных об инвестиционных затратах, постоянных и переменных эксплуатационных затратах для каждой конкретной установки. В анализе рассматривается коэффициент использования с 4000 часов работы на полной мощности электролизеров. Затраты на энергоресурсы из синтетических энергоносителей на углеродной основе в значительной степени зависят от цены поставки CO₂. Для синтетически произведенных энергоносителей в 2050 г. предполагается цена за CO₂ на уровне 47 евро/т CO₂ в промышленных процессах. Это явилось результатом анализа существующих сценариев улавливания и утилизации углерода¹⁶(CCU) как варианта снижения выбросов парниковых газов (ПГ). Цена за прямое улавливание диоксида углерода из воздуха установлена на уровне 390 евро/т CO₂ в 2020 г. и 220 евро в 2050 г., на основе результатов анализа существующих сценариев моделирования [29], [30]. Следует отметить,

¹⁵ Проект норвежского научно-исследовательского института SINTEF (одной из крупнейших исследовательских организаций в Европе), предназначенный для производства водорода и электроэнергии из ископаемых топлив с улавливанием и хранением диоксида углерода.

¹⁶ Процесс улавливания углекислого газа для дальнейшего использования.

что при более длительной работе на полной мощности цены на синтетический метан (см. сноску 12) значительно снизятся.

В обоих случаях, как производство синтетического топлива, так и прямое использование электроэнергии в приложениях на основе электроэнергии, цена за энергоресурсы связаны со 100%-ным использованием источников возобновляемой энергии (2020: 50,3 евро/МВтч; 2050: 39,5 евро/МВтч. Импорт синтетических топлив не разрешен в статическом анализе. Хотя синтетические топлива на основе электроэнергии предлагают более низкие цены на энергоносители, они связаны также с высокими уровнями неопределенности в отношении политической ситуации и размера процентной ставки, преобладающей за рубежом [31].

3.2. Технологические параметры в различных секторах

В этом подразделе рассмотрены технологии и применения из секторов домашних хозяйств, транспорта и промышленности, которые представлены и описаны. Для расчета полной стоимости аннуитета (см. сноску 5) для построения кривых ранжирования использовались данные из секторных моделей FfE (исследовательского центра по экономике энергетики) SopNA (частные домовладения) (см. сноску 8) [19], TraM (транспорт) (см. сноску 9) [20] и Smlnd (промышленность) (см. сноску 10) /FfE-08 19. Все соответствующие исходные параметры подытожены в Приложениях В и С.

В секторе частных домовладений делается различие между типами зданий и возрастным группам. Следует различать четыре типа зданий. Односемейные дома являются самыми маленькими типами зданий, и соответственно имеют самое низкое конечное потребление тепловой энергии. В общем, можно наблюдать, что по мере роста площади зданий возрастает и потребность его в тепловой энергии. Жилые дома разделяются на дополнительные классы в зависимости от их размера: небольшие, средние и большие. Кроме того, имеются различия в отношении возрастных групп. Здания, построенные до 1995 г., относятся к категории “старых зданий”, а недавно построенные здания, соответственно, к категории “новых зданий”. Применения в секторе частных домовладений, рассматриваемые в ходе исследования, охватывали 66% (281 ТВтч) общего потребления тепловой энергии обычного жилого сектора в 2015 г. (429 ТВтч) [32]. Если не принимать во внимание районное теплоснабжение, уголь и лигнит, так как только котлы на жидком и газообразном топливе имеют значение для анализа, и исследованные технологии охватывали 75% (281 ТВтч) общего потребления тепловой энергии в секторе частных домовладений (375 ТВтч) [32]. Исходными параметрами с наибольшим воздействием на результаты в секторе частных домовладений являются размер (площадь) здания, удельные инвестиции, полезный срок службы и эффективность отопительной системы. Удельные инвестиции можно рассчитать с использованием расчетной мощности отопительной системы, которая, в свою очередь, зависит от размера здания. За 30 лет предполагаемый полезный срок службы котлов на ископаемом топливе значительно выше, чем у тепловых насосов воздух-воздух. Основные литературные ссылочные источники в этом отношении охватывают инвестиции [33], полезный срок службы [34] и эффективность [2] или [35]. Подробное описание, которое относится к моделированию данного сектора, представлено в работе [19].

Транспортный сектор включает широкий диапазон исследованных применений в данном тексте. Поэтому требуется масштабный, (подробный) сбор исходных данных. Оба вида транспорта – пассажирский и грузовой транспорт – включены в

сортный анализ. Что касается движения автомобильного транспорта, то в анализе сделано различие между легковыми автомобилями, мотоциклами, городскими, междугородними автобусами и грузопассажирскими автомобилями. Легковые автомобили и грузопассажирские автомобили соответственно классифицируются на основе их размера. Железнодорожный транспорт подразделяется на пассажирские поезда, поезда дальнего следования, а также грузовые поезда. В воздушном транспорте сделано различие между пассажирскими и транспортными самолетами, которые дополнительно подразделяются на самолеты бизнес и малой авиации. В водном транспорте рассматриваются только внутренние водные пути. Для расчета удельных капитальных и эксплуатационных затрат на 1 км делается дополнительное различие, относящееся к годовому пробегу применений с использованием различных типов топлива, таких как бензин, дизельное топливо и природный газ. Это делается в отношении традиционного, синтетического топлива, а также в рамках электрического анализа, так как удельные затраты (евро/км) в значительной степени зависят от годового пробега для конкретного применения. Транспортные применения, рассматриваемые в ходе этого исследования, охватывают приблизительно 100% потребления энергии традиционного ископаемого топлива в секторе в 2015 г. [36]. Самыми важными исходными переменными в этом секторе являются удельное потребление энергии на км и инвестиционные затраты для соответствующей технологии. Что касается технологий автомобильного транспорта, то следует отметить, что электромобили на аккумуляторных источниках питания имеют более низкое потребление энергии, чем сопоставимые электромобили на топливных элементах. Однако электромобили на топливных элементах имеют преимущество над традиционным применением, относящееся к их коэффициенту преобразования энергии. Кроме того, некоторые замещающие технологии имеют более низкие инвестиционные затраты, чем традиционное применение. Обзор модельных затрат в транспортном секторе представлен в работе [20].

Вследствие неоднородности промышленного сектора и соответствующих неадекватных имеющихся данных, рассмотрены только индивидуальные процессы и температурные диапазоны, которые особенно пригодны для использования синтетических топлив. Основная часть исследований относится главным образом к производству стали, цемента и извести. Помимо этого, потребление газа для поставки в процесс тепловой энергии в температурном диапазоне выше 500°C в различных отраслях промышленности рассматривается в совокупности. В этом случае рассмотрено замещение традиционного природного газа синтетическим метаном. Не ожидается, что экономически эффективная электрификация в этом температурном диапазоне может быть достигнута при нынешнем состоянии технологии к 2050 г. Анализируемые применения охватывают примерно 67% (299 ТВтч) от общего потребления энергии традиционного ископаемого топлива в промышленности (451 ТВтч) [37]. Если учитывать только потребление газа, жидкого топлива и угля (за исключением использования районного теплоснабжения и других топлив), эта процентная доля возрастет до 78% (299 ТВтч из 384 ТВтч) [37].

Технические и финансовые исходные параметры для промышленного сектора подытожены в работах [26] и [38]. Моделируемые значения для промышленного сектора можно отыскать в работе [18]. Результаты, относящиеся к кривым ранжирования для синтетических топлив, которые иллюстрируются в этой статье, находятся главным образом под влиянием переменных CAPEX (капитальные

затраты) в виде срока службы технологии и инвестиций в нее, а также факторов, воздействующих на ОПЕХ (эксплуатационные затраты). Последние находятся главным образом под влиянием удельного потребления энергии, которое установлено либо в кВтч на 1 т продукции или получено из тепловой нагрузки процесса, эффективности преобразования энергии, а также от числа часов работы процесса на полной мощности. В зависимости от моделируемого процесса, инвестиции в технологию отражают либо инвестиции для вновь проектируемого технологического маршрута (производство стали) или в адаптацию в существующую инфраструктуру, которые являются необходимыми предварительными условиями для использования синтетических топлив в соответствующем процессе (производство цемента или извести).

4. Результаты и обсуждение

Для каждого из трех анализируемых случаев, описанных в подразделе 2.3, составлены кривые ранжирования [22], отражающие сравнение синтетических топлив с применениями синтетического топлива или электроэнергии. Результаты, представленные на рис. 4-1, основаны на предположении, что синтетические топлива используются в существующих применениях ископаемых топлив без каких-либо технологических изменений.

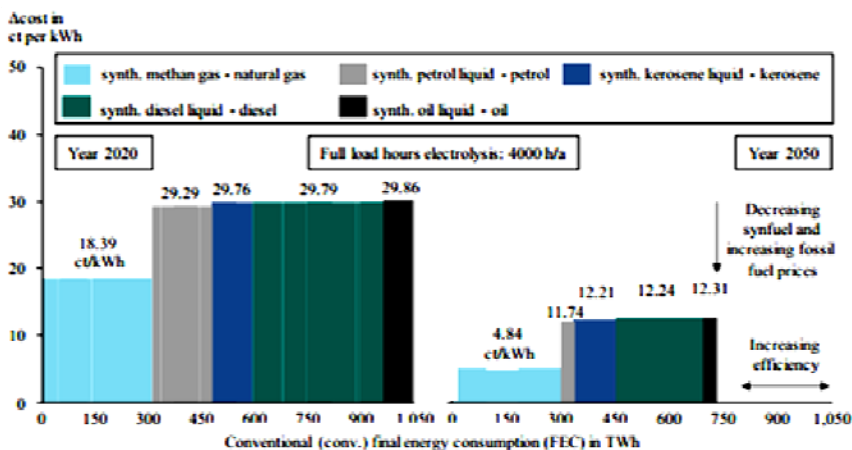


Рис. 4-1. Практическое применение ранжирования для синтетических топлив без технологических изменений в Германии в 2020 и 2050 гг. Сравнение: традиционные применения

Пояснения к рисунку: Δcost in ct per kWh – разница затрат евроцентов/кВтч, synth. methan gas – natural gas – синтетический газообразный метан – природный газ, synth. Diesel liquid – diesel – синтетическое дизельное топливо - дизтопливо, synth. petrol liquid – petrol – синтетический бензин - бензин, synth. oil liquid – oil – синтетическое жидкое топливо – жидкое топливо, synth. kerosene liquid – kerosene – синтетический керосин - керосин, Year 2020 – 2020 г., Full load hours electrolysis: 4000 h/a – полная нагрузка в часах для электролиза; 4000 ч/год, Year 2050 – 2050 г., ct/kWh – евроцентов/кВтч, Decreasing synfuel and increasing fossil fuel prices – снижение цен на синтетическое топливо и повышение цен на ископаемое топливо, Increasing efficiency – повышение эффективности, Conventional final energy consumption (FEC) in TWh – конечное потребление энергии традиционных источников в ТВтч

Итоговая кривая ранжирования на 2020 г. показана с левой стороны рис. 4-1, а на 2050 г. с правой стороны рис., соответственно. Получается, что если применения сравниваются только на основе замены энергоносителя без технологических изменений, с учетом равного энергопотребления и капитальных затрат для сравнительного применения и применений с синтетическими топливами, итоговая разница затрат не зависит от конкретного применения и сектора, а только от удельных энергозатрат различных источников энергии. Следовательно, без технологических изменений она будет зависеть только от стоимости энергии (энергоносителей), если будет достигнут ценовой паритет между синтетическими и традиционными топливами. Поэтому ценовое различие определяется исключительно ценами на энергоносители.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что использование синтетических топлив для чистого замещения энергии приводит к равным затратам для применений в транспорте¹⁷, жилых домах¹⁸ и промышленности¹⁹. Поэтому те же самые энергоносители можно обобщить по применениям. Синтетическое дизельное топливо используется также в транспортных средствах различных классов, когда не изменяющееся потребление энергии и инвестиционные затраты для сравнительного и замещающего применения определяют только цены на энергоносители путем дополнительных затрат на замещение. Это также означает, что пока затраты на электроэнергию будут выше, чем затраты на ископаемые топлива, топлива, полученные с использованием электроэнергии, не смогут достичь ценового паритета или даже ценового преимущества перед традиционными ископаемыми топливами. Однако в случае практического применения цены за CO₂ дадут возможность получения ценового преимущества для синтетических топлив с точки зрения участника рынка, даже при более низкой стоимости традиционных топлив.

Если, например, синтетический бензин, полученный с использованием электроэнергии, будет замещать традиционный бензин в транспортном секторе, не будет соответствующих технологических изменений, и, поэтому, не будет изменений в потреблении энергии и капитальных затратах. Итоговая разница в затратах между синтетическими и традиционными применениями в 29,29 евроцентов/кВтч, что, таким образом, соответствует только разнице между ценой на энергоресурсы в виде синтетического бензина (34,42 евроцентов/кВтч) и обычного бензина (5,13 евроцентов/кВтч). Это соображение действительно для всех других пар энергоносителей, представленных на рис. 4-1. К 2050 г. разница в затратах станет ниже, так как значительно снизятся цены на топливо, получаемое с использованием электроэнергии, вследствие снижения цен на электроэнергию в связи с использованием источников возобновляемой энергии.

Конечное потребление энергии в виде традиционных источников в 2050 г. значительно снизится в большинстве применений вследствие повышения энергоэффективности. Следует отметить, что с возрастанием мощностей для производства синтетических топлив и в связи с экономией масштаба в области производства крупных электролизеров, может быть достигнуто дальнейшее снижение цены. Затраты на энергоносители в виде синтетических топлив в

¹⁷ Замещение природного газа синтетическим метаном в транспортных средствах, работающих на природном газе.

¹⁸ Замещение природного газа синтетическим метаном в котлах на газообразном топливе.

¹⁹ Замещение природного газа синтетическим метаном в различных горелках.

значительной степени зависят от числа часов работы на полной мощности электролизера. Кроме того, в рамках этих и следующих соображений импорт синтетических топлив не разрешен. Если синтетические топлива импортируются из регионов с лучшими условиями для генерации энергии из возобновляемых источников, чем в Германии, ценовое различие может быть еще ниже [1], [31]. Однако дополнительные транспортные затраты и худшие инвестиционные условия типа ставки процента и менее привлекательных политических условий²⁰ могут привести к тому, что цены на синтетическое топливо будут еще дороже.

Если параллельно с замещением с замещением энергоносителя будут учитываться также технологические изменения в некоторых исследуемых применениях, результирующая эффективность и инвестиционные различия будут оказывать влияние на практическое применение кривых ранжирования. На рис. 4-2 представлены результаты сравнения между эффективными применениями на основе синтетического и традиционного топлива. Оказывается, что в 2050 г., исходя из точки зрения чисто экономической эффективности, использование синтетических топлив в конкретных применениях является более экономичным вариантом для альтернативы ископаемых топлив. Это относится к применениям, охватывающим порядка 14% (17 ТВтч) общего конечного потребления энергии в 2050 г. (857 ТВтч). Только применения в транспортном секторе превышают уровень безубыточности по сравнению с традиционными ископаемыми топливами. В частности, некоторые конкретные применения легковых автомобилей на синтетических топливах, как предполагается, намного более экономичные, чем альтернатива в виде традиционного топлива. Это можно объяснить за счет очевидно более высокой эффективности топливного элемента, по сравнению с традиционными видами топлива, такими как бензин или дизельное топливо. Несмотря на более высокие инвестиции электромобили с водородными топливными элементами могут дать экономию затрат до 20 евроцентов/кВтч, по сравнению с традиционными технологиями. Напротив, результаты сравнению, основанные на легковых автомобилях высшего класса, показывают, что в этом случае возможная экономия затрат находится под воздействием возрастающих инвестиций, связанных с более крупными топливными элементами и аккумуляторными батареями. Можно наблюдать нелинейный курс затрат на топливные элементы и аккумуляторные батареи от малых до больших систем привода. В будущем автобусы, грузопассажирские транспортные средства и внутренние водные пути также смогут эксплуатироваться отчасти дешевле с синтетическими топливами, как и с традиционными. В воздушном транспорте обычный авиационный керосин из ископаемого топлива будет заменен керосином, полученным с использованием электроэнергии вследствие отсутствия доступных альтернатив. Поэтому более высокие цены на энергоносители для синтетического керосина по сравнению с обычным керосином будут влиять только на разницу затрат. Как показано на рис. 4-1, результатом являются намного более высокие затраты (+ 12,21 евроцентов/кВтч) по сравнению с традиционным применением.

²⁰ В зависимости от региона и расстояния до места импорта.

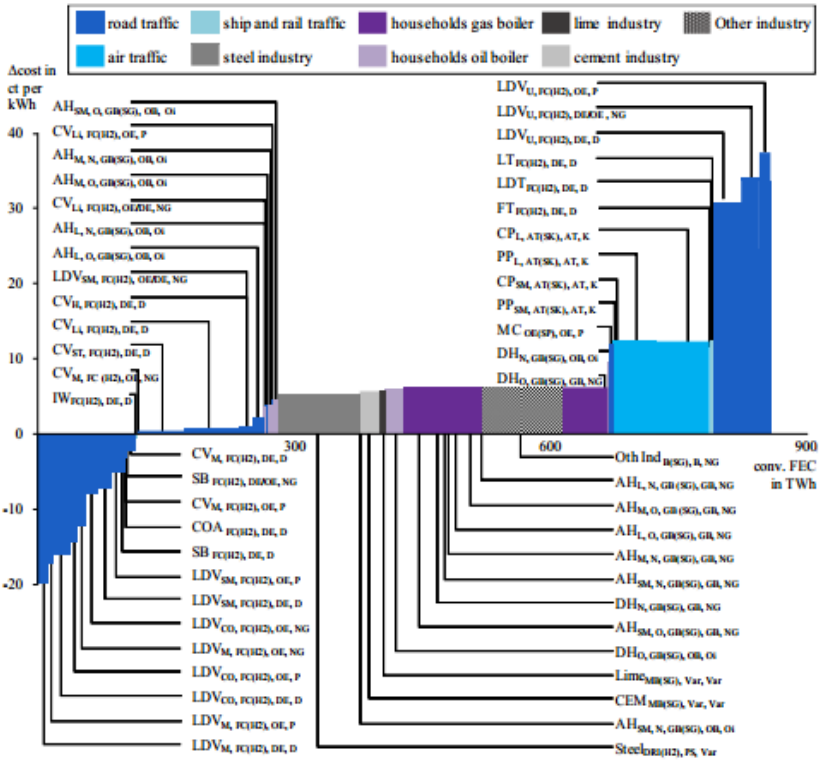


Рис. 4-2. Практическое применение ранжирования синтетических топлив в Германии в 2050 г. - Сравнение: традиционные ископаемые топлива и технологии

Сокращения: LDV – легковой автомобиль, SB – городской автобус, COA – междугородный автобус, CV – грузопассажирское транспортное средство, IW- внутренние водные пути, MC - мотоцикл, PP – пассажирский самолет, CP – транспортный самолет, FT – товарный поезд, LDT – поезд дальнего следования, LT – поезд местного сообщения, AH – жилой дом, DH – односемейный дом, Oth Ind – другие отрасли промышленности, PS – общепотребительная сталь, SM - небольшой, CO – класса “компакт”, M – средний, U – высший класс, Li - легкий, H - тяжелый, ST - полуприцеп, L - крупный, DRI – прямое восстановление железа, Cem – цементная промышленность, Lime- известковая промышленность, N - новый, O - старый, OB – котел на жидком топливе, FC – водородный топливный элемент, OE – карбюраторный двигатель, DE – дизельный двигатель, SG – синтез-газ, GB – котел на газообразном топливе, Hyd - водород, SP – синтетический бензин, SK – синтетический керосин, NG – природный газ, OI - нефть, P - бензин, D – дизельное топливо, MB – мультитопливная горелка, Var – другой энергоноситель, AT – авиационная турбина

Общие дополнительные затраты по сравнению с традиционными технологиями составят 48 млрд. евро в 2050 г., считая, что все исследованные применения основаны на синтетическом топливе. Для сравнения: в соответствии с немецким “Законом об источниках возобновляемой энергии” в 2018 г. они составили свыше 25 млрд. евро [39].

На следующей стадии (рис. 4-3) каждое из упомянутых эффективных применений синтетического топлива сравнивается с их электрической альтернативой, если таковая имеется.

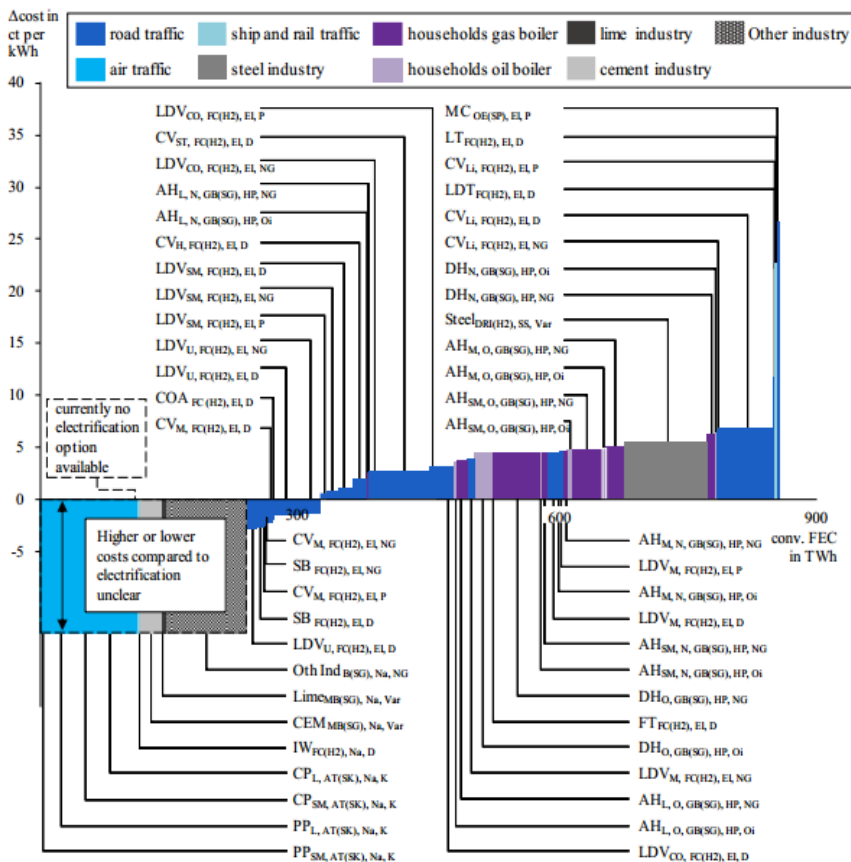


Рис. 4-3. Практическое применение ранжирования синтетических топлив в Германии в 2050 г.-сравнение: электрические технологии и применения

Пояснения к рисунку: road traffic – движение транспорта по дорогам, air traffic – движение воздушного транспорта, ship and rail traffic – движение судов и железнодорожного транспорта, steel industry – черная металлургия, households gas boiler – бытовой котел на газообразном топливе, households oil boiler- бытовой котел на жидком топливе, currently no electrification option available – в настоящее время не имеется вариант электрификации, Higher or lower costs compared to electrification unclear – нет ясности в том, будут ли затраты выше или ниже по сравнению с электрификацией, conv. FEC in TWh - конечное потребление энергии в ТВтч, сокращение: SS – сталь ограниченного применения, остальные сокращения, как на рис. 4-2

Для почти 28% (240 ТВтч) исследованных применений (857 ТВтч) невозможно было идентифицировать сопоставимой апробированной технологии и эффективных вариантов электрификации. Это относится к применениям в воздушном и внутреннем водном транспорте, цементной и известковой промышленности, а также к другим промышленным процессам, связанным с потреблением газа с температурными уровнями выше 500°C. Тем не менее, для учета энергопотребления в этих применениях, оно должно быть включено в ранжирование с фиктивными ценовыми различиями в 10 евроцентов/кВтч, относящимися к самому минимальному представленному варианту (легковые автомобили высшего класса). Подобным образом, для Случая 2 результаты демонстрируют, что синтетические топлива предположительно обеспечивают экономически эффективные варианты уменьшения потребления ископаемых топлив, по сравнению с альтернативой электрификации, относительно некоторых конкретных применений в транспортном секторе. При включении не электрифицируемых применений с использованием синтетических топлив более трети (325 ТВтч) применений относится к экономически эффективному уменьшению потребления ископаемых топлив с помощью применения синтетических топлив. Однако, если исключить не электрифицированные применения с использованием синтетических топлив, только 14% применений, которые охватывают 85 ТВтч энергопотребления, имеют более низкие затраты с системной точки зрения, учитывая использование синтетических топлив. Это соответствует доле менее 10% общего конечного потребления энергии всех исследованных применений в 2050 г. Получающиеся 14% сопоставимы со значениями, достигнутыми по результатам Случая 2 (см. рис. 4-2). Однако не выявлена причинно-следственная связь.

При исследовании ранжирования применений с синтетическим топливом и вариантом электрификации для уменьшения потребления ископаемых топлив в секторах конечного потребления энергии в порядке ранжирования выявлены четкие различия при сравнении синтетических топлив с традиционными применениями. Например, в Случае 3 легковые автомобили высшего класса, работающие на синтетическом топливе, отчасти дешевле, чем электрифицированный вариант в этом сегменте. Это связано главным образом с заметно более высокими инвестиционными затратами для крупных аккумуляторных батарей в транспортных средствах. Для гибридных автомобилей за счет дополнительного использования топливных элементов в транспортных средствах можно достичь значительно меньших суммарных затрат. Поэтому транспортные средства высшего класса с топливным элементом обеспечивают более экономически эффективный вариант уменьшения потребления ископаемых топлив, по сравнению с электрифицированной альтернативой. Этот эффект можно также наблюдать в других дорожных транспортных средствах типа городских и междугородних автобусов, для которых требуется более высокая дальность пробега вследствие высокого годового пробега. Меньшего размера и более легкие полностью электрифицированные легковые автомобили имеют меньшие суммарные затраты с системной точки зрения, несмотря на соответствующие более высокие инвестиции. Это связано с их значительно более низкими эксплуатационными затратами на км пробега. То же самое применимо к транспортным средствам типа “компакт” и среднего класса. Удивительно, что вариант электрификации является экономически более эффективным

альтернативой, особенно для крупных грузопассажирских автомобилей с большой грузоподъемностью. Это связано с тем фактом, что несколько пониженные капитальные затраты для применений с синтетическим топливом оказывают меньшее влияние на разницу в затратах, по сравнению с повышенной экономией вследствие эксплуатационных затрат, обеспеченной электрифицированным вариантом, относящимся к конкретной технологии высокого годового пробега. Как ожидается, применения железнодорожного транспорта, который в настоящее время уже электрифицирован, станут намного более экономически эффективным вариантом для уменьшения использования ископаемых топлив, по сравнению с использованием синтетических топлив в 2050 г. Что касается мотоциклов, для которых не имеется варианта с топливными элементами, то на результаты будет оказывать влияние использование жидких топлив, полученных с использованием электроэнергии. Поэтому сравнение вариантов с синтетическим топливом с их электрической альтернативой для этого случая приведет к самой высокой разнице в затратах среди всех оцененных применений.

В частных домовладениях электрификация с помощью тепловых насосов является экономически более эффективным вариантом уменьшения потребления ископаемых топлив по сравнению с альтернативой в виде синтетических топлив. Этот результат находится в соответствии с большинством сценариев энергетической и климатической политики, который свидетельствует о широком использовании тепловых насосов в секторе домашнего хозяйства ([3], [40], [4]). В соответствии с дополнительными исследованиями в области энергетики и климата, синтетические топлива редко используются в секторе домашнего хозяйства. В низкотемпературном тепловом диапазоне в дополнение к тепловым насосам предполагается, что использование электродных котлов²¹ станет эффективным вариантом электрификации, но эта технология не оценивалась в работе. В отличие от использования синтетических топлив применение электрификации обеспечивает экономии затрат, особенно в небольших частных домах. По мере увеличения площади дома издержки за счет электрификации снижаются не пропорционально тепловой нагрузке, с системной точки зрения, вследствие больших инвестиций для более крупных воздушных тепловых насосов, по сравнению с котлами на газообразном топливе. Тем не менее, воздушные тепловые насосы являются все еще более подходящим выбором в этом сегменте, благодаря их более низким эксплуатационным затратам, что связано с более низкой ценой за электроэнергию, по сравнению с ценами на синтетические топлива.

Для исследованных процессов в промышленности почти не имеются варианты электрификации. Только производство стали ограниченного применения можно сравнить с процессами прямого восстановления и плавления в электродуговой печи. Основой для сравнения является традиционное потребление энергии для производства общепотребительной стали. Для

²¹ Электродный котел – электрический водонагреватель, не использующий нагревательных элементов. Процесс нагрева в таком котле происходит при протекании электрического тока через теплоноситель, за счет электрического сопротивления которого и происходит нагрев. В качестве теплоносителя используется дистиллированная вода с добавкой поваренной соли.

рассмотренного потребления в цементной и известковой промышленности, а также промышленного потребления газа с температурой выше 500°C не имеется апробированной технологии и эффективного варианта электрификации. Если сравнивать прямое восстановление и производство стали ограниченного применения, то для последнего не имеется очевидного ценового преимущества. Это связано с тем, что для производства стали ограниченного применения как капитальные, так и эксплуатационные затраты ниже. Следует отметить, что производство во всем мире стали на основе лома черных металлов в 2050 г. не является реалистичным сценарием вследствие достаточного наличия запасов лома [41]. Поэтому для полного отказа от использования ископаемых топлив в производстве стали в черной металлургии потребуются прямое восстановление с водородом.

Ранжирование дает неоднородные результаты в отношении различных проанализированных секторов, хотя применения в различных секторах находятся в близком диапазоне в отношении общих удельных затрат. Межотраслевое ранжирование можно проводить отличным способом от представленного здесь, с существенным изменением. Анализ чувствительности не является частью исследованных вопросов, но его следует иметь в виду как важный аспект при проведении будущих работ в этой области. В общем, если в исследованных применениях перейти на синтетические топлива, затраты системы возрастут на 22 млрд. евро к 2050 г., по сравнению с полностью электрифицированной альтернативой уменьшения потребления ископаемых топлив.

Это утверждение не включает 240 ТВтч, относящихся к не электрифицированным применениям, невозможным с нынешней точки зрения. С учетом предполагаемой фиктивной ценовой разницы в 10 евроцентов/кВтч между синтетическими топливами и электрифицированным вариантом, общая разница в затратах снизится на 24 млрд. евро. В рамках этих условий в этом мысленном эксперименте синтетические топлива в общем оцениваются как экономически более эффективные, чем электрификация. И, наконец, следует отметить, что должно значительно снизиться обычное потребление энергии, особенно вследствие электрификации, но также и за счет использования синтетических топлив, связанного с более высокой эффективностью, по сравнению с традиционными применениями.

5. Заключение

Практические применения кривых ранжирования для синтетических топлив в энергетической системе Германии демонстрируют с точки зрения затрат, что существуют области, для которых проводится сравнение синтетических топлив с традиционными ископаемыми топливами, когда применение первых, а также применения электрификации предпочтительнее, чем применение ископаемых топлив. Замещение ископаемых топлив топливами, полученными с использованием электроэнергии, без технологических изменений выявило, что экономическая эффективность в этих случаях зависит только от цен на энергоносители. По сравнению с 2020 г. ожидается более низкое потребление конечной энергии в 2050 г., вследствие улучшений в эффективности применения. Кроме того, разница в затратах между синтетическими топливами, полученными с помощью электроэнергии, и традиционными топливами становится меньше. Это является результатом роста стоимости ископаемого топлива параллельно с

тенденцией снижения цен на электроэнергию из источников возобновляемой энергии, в сочетании с экономикой масштаба при производстве синтетического топлива. Тем не менее, без технологических изменений ни одно из исследованных применений синтетического топлива не сможет достичь ценового паритета с вариантом традиционного топлива. Это позволяет сделать вывод, что до тех пор, пока стоимость электроэнергии из синтетического топлива будет выше стоимости электроэнергии из ископаемых топлив, синтетические топлива, произведенные с использованием электроэнергии, не обеспечат рентабельности с системной точки зрения.

Напротив, с учетом технологических изменений, около 14% исследованных применений синтетических топлив могут обеспечить ценовые преимущества по сравнению с традиционным вариантом. Это связано главным образом с более высокой эффективностью, и, следовательно, с более низкими эксплуатационными затратами для применений с синтетическими топливами, что часто компенсирует их более высокие капитальные затраты. Ценовые преимущества синтетических топлив очевидны в особенности в транспортном секторе. Считая, что все исследованные применения перейдут на синтетические топлива, это приведет примерно к 48 млрд. евро дополнительных совокупных затрат по сравнению с традиционной альтернативой.

В последнем проанализированном случае применения синтетического топлива с электрической альтернативой. На основе электроэнергии, производимой из возобновляемых источников, оба варианта могут обеспечить почти полное исключение применения ископаемых топлив. Очевидно, что примерно для 28% (240 ТВтч) всех исследованных применений не имеется технологически апробированного и эффективного варианта электрификации. Кроме того, часть применений, охватывающих примерно 85 ТВтч потребности в энергии, может оказаться экономически очень эффективными при использовании синтетических топлив, чем в случае полностью электрифицированных вариантов. Однако следует подтвердить, что использование синтетических топлив, как в промышленном, так и в транспортном секторе требует параллельно частичной электрификации. Это применяется, например, к автомобилям с топливными элементами, когда динамика движения транспортных средств требует наличия аккумуляторных батарей [42]. В случае прямого восстановления железа с использованием водорода в черной металлургии требуется электродуговая печь для процесса плавления [43]. Аналогично Случаю 2, когда синтетические топлива сравнивались с традиционными применениями на основе ископаемых топлив, сравнение между синтетическими топливами и электрификацией демонстрирует, что использование синтетических топлив предлагает экономически эффективную альтернативу, особенно в транспортном секторе. Дополнительные общие издержки составляют порядка 22 млрд. евро за счет применения топлив, полученных с использованием электроэнергии (исключены не электрифицированные варианты). Учитывая, что ценовое различие составляет только 10 евроцентов/кВтч между синтетическими топливами и теоретически возможными вариантами электрификации, использование полностью синтетических топлив является более экономически эффективным, чем полностью электрифицированная альтернатива. В то время как общие утверждения дают обзор всего диапазона затрат, результаты показывают, что каждое применение следует рассматривать отдельно, для того чтобы достичь

оптимального с точки зрения затрат уменьшения использования ископаемых топлив, с системной точки зрения.

Однако следует отметить, что проведенный анализ связан со значительной неопределенностью в отношении изменения затрат на энергию и технологию. Хотя не был проведен анализ чувствительности, становится ясным, что небольшие изменения в затратах на энергоносители могут привести к значительным различиям в межотраслевом ранжировании с изменением знака дифференциальных затрат.

Затраты на инфраструктуру электроэнергетики в транспортном секторе не включены в анализ, но ожидается, что должно быть изменение результатов в направлении более интенсивного использования синтетических топлив. Однако следует отметить, что развитие водородной инфраструктуры также связано с высокими инвестициями. Развитие уже имеющейся инфраструктуры в прошлом приводило к высоким инвестиционным затратам. В связи с этим возникает вопрос, будет ли поддержание уже существующей инфраструктуры ограничивать использование некоторых высокоэффективных применений, которые экономически более выгодны, чем разработка новой технологии, адекватной в долгосрочной перспективе. Так как ранжирование позволяет провести сравнение статического ранжирования, изменяющийся спрос на данный энергоноситель не приведет к изменению его цены. Однако цена должна находиться под воздействием итогового изменения рыночного спроса, что приведет, например, к более высоким ценам на синтетические топлива. Дополнительные исследования могут расширить технологический спектр этого анализа не только в отношении дальнейших применений в транспортном секторе, секторе домашних хозяйств и промышленности, но включают также применения в коммерческой деятельности, торговле, сфере услуг и энергетике. Данные, представленные в Приложениях А, В и С, можно использовать для проведения анализа чувствительности в будущих исследованиях.

Анализ показал, что на основе выбора надлежащей технологии использование синтетических топлив можно обеспечить экономически эффективный вариант уменьшения использования ископаемых топлив, с системной точки зрения. Оказывается, что для предотвращения неэффективности в секторах конечного потребления энергии должны быть разработаны конкретные решения для применений вместо того, чтобы полагаться на однородный способ уменьшения использования ископаемых топлив, основанный, например, на полностью электрифицированных применениях. Результаты указывают, что смесь различных конкретных применений синтетического топлива и электрификации в сочетании с высоким уровнем приемлемости для принятия новых технологий представляют важнейшие элементы в направлении экономически осуществимого уменьшения использования ископаемых топлив энергетической системы. Общая экономическая эффективность системы уменьшения использования ископаемых топлив достигается лучше с помощью смеси технологий. Универсальное решение не рекомендуется вследствие разнородности секторов конечного потребления энергии. Технологическая открытость является ключом для выбора оптимального с точки зрения затрат пути к трансформации энергетической системы в направлении уменьшения использования ископаемых топлив.

Библиография

1. Hübner, Tobias et al.: Die Rolle synthetischer Brennstoffe zur Erreichung der klimapolitischen Ziele - Bedeutung im Jahr 2050. In: BWK (Brennstoff, Wärme, Kraft) - Das Energie-Fachmagazin 10/2018. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, 2018.
2. Kruse, Jürgen et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Teil B. Köln: ewi Energy Research & Scenarios gGmbH, 2018.
3. Gebert, Philipp et al.: Klimapfade für Deutschland. München: The Boston Consulting Group (BCG), prognos, 2018.
4. Repenning, Julia; Emele, Lukas; Blanck, Ruth et al.: Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht. Berlin: Öko-Institut e.V., 2015
5. Schlesinger, Michael; Lindenberger, Dietmar; Lutz, Christian: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose - Projekt Nr. 57/12 - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie . Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2014.
6. Köckhuber, Claudius; Guminski, Andrej; von Roon, Serafin: Die Grenzen der Elektrifizierung - Analyse und Bewertung von Green Fuels als Ergänzung zu Strom im dekarbonisierten Energiesystem in: et - Energiewirtschaftliche Tagesfragen 67. Jg. (2017) Heft 8. Essen: etv Energieverlag GmbH, 2017
7. Klein, Sebastian et al.: Erneuerbare Gase - ein Systemupdate der Energiewende. Berlin: enervis energy advisors GmbH, 2017.
8. Graf, Mario; Kattowitz: Gutes Ergebnis und ein Problem für die Schweiz. In: <https://www.energate-messenger.ch/news/188335/kattowitz-gutes-ergebnis-und-ein-problem-fuer-die-schweiz>. (Abruf am 2018-12-18); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/74lQcmk63>); Essen: energate gmbh, 2018.
9. Die Bundesregierung: Klimaabkommen von Paris wird Gesetz in: <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2016/07/2016-07-06-ratifizierung-pariser-klimaabkommen.html> (Abruf: 29.06.2017) (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6rZrhjoQj>). Berlin: Die Bundesregierung, 2016
10. Schenuit, Carolin; Heuke, Reemt; Paschke, Jan: Potenzialatlas Power to Gas - Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2016
11. Vorholz, Fritz et al.: Strombasierte Brennstoffe: Für den Klimaschutz so viel wie nötig, aus Effizienzgründen so wenig wie möglich. Berlin: Agora Verkehrswende, 2018.
12. Ruhнау, Oliver et al.: Direct or indirect electrification? A review of heat generation and road transport decarbonisation scenarios for Germany 2050. Energy, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.114>
13. Philibert, Cédric: Renewable Energy for Industry: From green energy to green materials and fuels. Paris: International Energy Agency, 2017.
14. Estermann, Thomas et al.: Kurzstudie Power-to-X - Ermittlung des Potenzials von PtX-Anwendungen für die Netzplanung der deutschen ÜNB. München: ffe, 2017.
15. Pichlmaier, Simon et al.: Modelling the Transport Sector in the Context of a Dynamic Energy System, 41st IAEE conference Groningen. Research Center for Energy Economics, Munich. 2018.

16. Veitengruber, Frank et al.: Potenzialanalyse zur Hybridisierung von Prozessen in der Grundstoffindustrie. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2019.
17. Bataille, Christ et al.: A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. In: Journal of Cleaner Production 2018 (187) 960-973. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2018.
18. Hübner, Tobias et al.: Modellgestützte Analyse synthetischer Brennstoffe in der Industrie bei ambitioniertem Klimaschutz. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE), 2019.
19. Conrad, Jochen et al.: Modelling the Private Households Sector and the Impact on the Energy System. 41st IAEE conference 10-13 June 2018, Groningen, The Netherlands.
20. Bayer, Caspar et al.: Der Einfluss von Prognoseunsicherheiten auf CO₂-Verminderungskosten im Pkw-Bereich. In: et - Energiewirtschaftliche Tagesfragen 11/2018. Berlin: EW Medien und Kongresse GmbH, 2018.
21. Guminski, Andrej et al.: Model based evaluation of industrial greenhouse gas abatement measures (in-review). Wien, Österreich: 11. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 2019.
22. Guminski, Andrej; von Roon, Serafin: Transition Towards an “All-electric World” - Developing a Merit-Order of Electrification for the German Energy System in: 10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien. Wien, Österreich: Technische Universität Wien, 2017
23. Unger, H.; Wagner, H.-J.; et al.: Validierung und kommunale Disaggregation des Expertensystems HERAKLES - Abschlussbericht zum Vorhaben 258 114 98. Bochum: Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Ruhr-Universität Bochum (LEE), 2002
24. Günther, Jens et al.: Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. Berlin: Umweltbundesamt, 2017.
25. Palm, Ellen et al.: Electricity-based plastics and their potential demand for electricity and carbon dioxide. In: Journal of Cleaner Production 129 (2016) 548-555. Amsterdam: Elsevier, 2016.
26. Kleinertz, Britta et al.: CO₂-Verminderungskosten von Gasen - Projekt in Auftrag von EnBW Energie Baden-Württemberg AG. In: <https://www.ffe.de/themen-und-methoden/ressourcen-und-klimaschutz/764-co2-verminderungskosten-von-gasen-entwicklung-statischer-co2-verminderungskostenkurven>. (Abruf am 2018-07-17); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/70yXTypsa>); München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2018.
27. Regett, Conrad, Fattler: Laufendes Projekt: Verbundprojekt Dynamis - Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems. In: www.ffe.de/dynamis. (Abruf am 2018-05); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6zfwkHdi3>); München, München: FfE e.V., 2018.
28. Böing, Felix; Murmann, Alexander; Pelling, Christoph: ISAaR - Integriertes Simulationsmodell zur Anlageneinsatz- und Ausbauplanung mit Regionalisierung in: <https://www.ffe.de/themen-und-methoden/modelle-und-tools/625-isaar-integriertes-simulationsmodell> (Abruf: 12.09.2017) Archived by WebCite <http://www.webcitation.org/6tQ5Gxmi1>. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), 2016

29. Bründerlinger, Thomas et al.: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen. Berlin: dena, 2018.
30. Schmidt, Patrick; Zittel, Werner; Weindorf, Werner; Rashka, Tetyana: Renewables in Transport 2050 - Empowering a Sustainable Mobility Future With Zero Emission Fuels From Renewable Electricity. Frankfurt am Main: FVV-Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V., 2016
31. Deutsch, Matthias et al.: Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Berlin: Agora Energiewende, 2018.
32. Umweltbundesamt (UBA): Energieverbrauch privater Haushalte. In: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte>. (Abruf am 2019-05-04); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/7879Bdqou>); Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2018.
33. Wolff, Dieter; Jagnow, Kati: Überlegungen zu Einsatzgrenzen und zur Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung. Wolfenbüttel: Ostfalia Hochschule Wolfenbüttel, 2011
34. VDI 2067 - Energieaufwand für die Erzeugung in: VDI-Richtlinien. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2013
35. Günther, Danny; Miara, Marek et al.: WP Monitor - Feldmessung von Wärmepumpenanlagen. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), 2014
36. Umweltbundesamt (UBA): Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs. In: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs#textpart-1>. (Abruf am 2019-05-04); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/787B88N9K>); Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2018.
37. Umweltbundesamt (UBA): Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen. In: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraeger-sektoren>. (Abruf am 2019-05-04); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/787AvUk7m>); Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2019.
38. Guminski, Andrej et al.: Energiewende in der Industrie: Methodik zur Identifikation und Quantifizierung von Dekarbonisierungsmaßnahmen. In: et Energiewirtschaftliche Tagesfragen (Ausgabe 12/2017). Essen: etv Energieverlag GmbH, 2017.
39. ÜNB Deutschland: Prognose der EEG-Umlage 2019 nach EEV. Berlin, Dortmund, Bayreuth, Stuttgart: Übertragungsnetzbetreiber Deutschland, 2018.
40. Pfluger, Benjamin et al.: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), 2017.
41. Wörtler, Martin; Schuler, Felix; Voigt, Nicole; Schmidt, Torben; Dahmann, Peter; Lungen, Hans; Ghenda, Jean-Theo: Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050 - Technical and economic analysis of the sector's CO2 abatement potential. Boston: Steel Institute (VDEh), 2013
42. Huss, Alexander: Elektromobilität mit Wasserstoff und Brennstoffzelle - Stand der Entwicklung und Markteinführung bei PKW in Deutschland. Berlin: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2017

43. Weigel, Max: Ganzheitliche Bewertung zukünftig verfügbarer primärer Stahlherstellungsverfahren - Einschätzung der möglichen Rolle von Wasserstoff als Reduktionsmittel. Wuppertal: Bergischen Universität Wuppertal, 2014.
44. Genehmigung des Szenariorahmens für die Netzentwicklungsplanung 2019-2030. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), 2018.
45. Preiszusammensetzungen - Superbenzin, Dieselmotortreibstoff, leichtes Heizöl in: <https://www.mwv.de/statistiken/preiszusammensetzung/>. Berlin: Mineralölwirtschaftsverband e.V. (MWW), 2017
46. Rohstoffpreise in: <http://www.indexmundi.com/de/rohstoffpreise/>. Vancouver, USA: Indexmundi, 2017
47. Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und internationale Entwicklung. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2017
48. Pfenning, Maximilian; Gerhardt, Norman et al.: Mittel- und Langfristige Potenziale von PTL- und H2- Importen aus internationalen EE-Vorzugsregionen - Teilbericht im Rahmen des Projektes: Klimawirksamkeit Elektromobilität - Entwicklungsoptionen des Straßenverkehrs unter Berücksichtigung der Rückkopplung des Energieversorgungssystems in Hinblick auf mittel- und langfristige Klimaziele. Kassel: Fraunhofer IWES, 2017
49. Fasihi, Mahdi et al.: Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants. Lappeenranta (Finland): Lappeenranta University of Technology, 2016.
50. Fasihi, Mahdi; Bogdaniv, Dimitrii; Beyer Christian: Long-Term Hydrocarbon Trade Options for the Maghreb Region and Europe - Renewable Energy Based Synthetic Fuels for a Net Zero Emissions World in: Sustainability 2017. Lappeenranta, Finnland: School of Energy Systems, Lappeenranta University of Technology, 2017
51. Dietrich, Ralph-Uwe et al.: Erzeugung alternativer flüssiger Kraftstoffe im zukünftigen Energiesystem. In: Chemie Ingenieur Technik Vol. 90, No 1-2, 179-192. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2018.

7. Приложение

В Приложении имеются основные данные для расчета дифференцированных затрат. Приложение состоит из трех основных компонентов: (1) цен на энергоносители; (2) удельных капитальных и эксплуатационных затрат; (3) удельного потребления для традиционных применений.

Приложение А: Цены на энергоносители

Таблица 7-1.

Цены на соответствующие энергоносители

Энергоноситель	Цена на энергоносители (евро/МВтч)	Цена на энергоносители (евро/МВтч)	Источник и происхождение
	2020	2050	
Каменный уголь	8,4	9,8	[44] Сценарий В, [5]
Лигнит	5,9	5,6	[44] Сценарий В, [5]
Природный газ	22,7	28,1	[44] Сценарий В, [5]
Бензин	51,3	64,3	[45] и рост на основе роста цен на нефть
Дизтопливо	46,3	59,3	[45] и рост на основе роста цен на нефть
Керосин	46,6	59,6	[46] и рост на основе роста цен на нефть
Нефть	40	53	[44] Сценарий В, без дальнейшего роста после 2035 г.
Легкие фракции нефти	45,6	58,6	[45] и рост на основе роста цен на нефть
Сырая нефть	22,8	30,2	[47] и рост на основе роста цен на нефть
Нефтяное топливо	29,8	51,8	Собственная оценка
Биомасса	27,6	26,3	Собственная оценка
Кокс	1,7	1,7	Собственная оценка
Конвертерный и доменный газ	0	0	Собственная оценка
Другие виды топлива	3,1	3,1	Собственная оценка
Районное теплоснабжение	19,4	34,6	На основе моделирования
Обычная электроэнергия	47,4	75,6	На основе моделирования
Обычный водород	23,6	28,1	На основе моделирования
Жидкое синтетическое топливо, полученное электролизом (жидкое дизтопливо, бензин, керосин)	344,2	181,7	Расчет на основе [48], [49], [50], [51] и собственных предположений
Синтетический метан из CO ₂	218,8	88,6	Собственный расчет на основе [14]
Электролизный водород	146,3	63,6	Собственный расчет на основе [14]
Электроэнергия из возобновляемых источников	50,3	39,5	Собственный расчет на основе оценок будущей смеси RES ²² в Германии

²² Источники возобновляемой энергии.

**Приложение В: Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для различных секторов, технологий**

В следующем разделе представлены удельные капитальные и эксплуатационные затраты для традиционных применений, применений с синтетическими топливами и электрификацией, которые служат основой для выполнения ранжирования

**Приложение В1: Применения с использованием традиционных технологий и
ископаемых топлив**

Таблица 7-2.

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием ископаемых топлив
в секторе домашнего хозяйства**

Сектор домашнего хозяйства			Удельные капитальные затраты [евро/здание]		Удельные эксплуатационные затраты [евро/здание]	
Тип здания	Возраст здания	Ископаемое топливо/применение	2020	2050	2020	2050
Дом на одну семью	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	831	758	1085	1396
		Котел на газообразном топливе	1554	1499	533	660
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	690	784	706	877
		Котел на газообразном топливе	1433	1756	349	423
Небольшой жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	1166	1058	2144	2741
		Котел на газообразном топливе	1856	1773	1059	1032
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	1073	1201	1513	1939
		Котел на газообразном топливе	1772	1992	748	925
Средний жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	1631	1749	3616	4568
		Котел на газообразном топливе	2292	2172	1785	2170
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	1540	1849	2709	3597
		Котел на газообразном топливе	2205	2498	1339	1686
Большой жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	2711	2457	7922	9994
		Котел на газообразном топливе	3378	3171	3911	4749
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	2657	2984	5568	7159
		Котел на газообразном топливе	3322	3556	2755	3411

Таблица 7-3.

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием традиционных
ископаемых топлив в транспортном секторе**

Транспортный сектор		Удельные капитальные затраты (евро/км)		Удельные эксплуатационные затраты (евро/км)	
		2020	2050	2020	2050
Виды транспорта	Ископаемое топливо/применение				
Небольшой легковой автомобиль	Бензин	0,214	0,207	0,026	0,027
	Дизтопливо	0,118	0,148	0,019	0,019
	Газ	0,082	0,123	0,011	0,012
Легковой автомобиль класса "компакт"	Бензин	0,3	0,288	0,03	0,032
	Дизтопливо	0,166	0,209	0,023	0,023
	Газ	0,13	0,194	0,013	0,013
Легковой автомобиль среднего класса	Бензин	0,379	0,36	0,031	0,033
	Дизтопливо	0,213	0,265	0,025	0,025
	Газ	0,173	0,254	0,013	0,014
Легковой автомобиль высшего класса	Бензин	0,554	0,524	0,035	0,037
	Дизтопливо	0,265	0,33	0,031	0,031
	Газ	0,213	0,314	0,015	0,016
Мотоцикл	Бензин	0,192	0,201	0,021	0,024
Городской автобус	Дизтопливо	0,98	0,983	0,21	0,27
	Газ	1,068	1,045	0,104	0,133
Междугородный автобус	Дизтопливо	0,239	0,24	0,142	0,184
Пригородный поезд	Дизтопливо	2,143	2,184	0,372	0,476
Поезд дальнего сообщения	Дизтопливо	1,157	1,157	0,172	0,22
Небольшой пассажирский самолет	Керосин	2,677	2,677	2,011	1,902
Большой пассажирский самолет	Керосин	7,024	7,024	3,286	3,109
Малотоннажное грузопассажирское транспортное средство	Бензин	0,347	0,381	0,053	0,06
	Дизтопливо	0,203	0,229	0,06	0,064
	Газ	0,19	0,199	0,028	0,029
Грузопассажирское транспортное средство средней тоннажности	Бензин	0,261	0,248	0,099	0,113
	Дизтопливо	0,206	0,201	0,109	0,127
	Газ	0,263	0,225	0,051	0,053
Много тоннажное грузопассажирское Транспортное средство	Дизтопливо	0,37	0,368	0,156	0,152
Бортовой полуприцеп	Дизтопливо	0,325	0,355	0,202	0,198
Грузовой поезд	Дизтопливо	52,433	58,208	8,484	10,866
Небольшой транспортный самолет	Керосин	2,677	2,677	2,011	1,902
Большой транспортный самолет	Керосин	7,024	7,024	3,286	3,109
Суда речного сообщения	Дизтопливо	6,167	6,167	3,251	4,164

Таблица 7-4.

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием
ископаемых топлив в промышленности**

Промышленный сектор	Удельные кап затраты (евро/т)		Удельные эксл. затраты (евро/т)	
	2020	2050	2020	2050
Производственный процесс	2020	2050	2020	2050
Производство стали	133	133	37	41
Цементное производство	Не определены	Не определены	9	8
Известковое производство	Не определены	Не определены	15	15
Другие отрасли промышленности (потребление газа с температурой выше 500°C)	Суммарные затраты			
Другие промышленные процессы	2020		2050	
Другие отрасли	Не определены		Не определены	
Другие отрасли промышленности без производства стали, цемента и извести	Не определены		Не определены	

Приложение В2: Применение технологий с синтетическим топливом

Таблица 7-5.

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием
синтетических топлив в секторе домашнего хозяйства**

Сектор домашнего хозяйства			Удельные кап затраты (евро/здание)		Удельные эксл. затраты (евро/здание)	
Тип здания	Возраст здания	Применение синтетического топлива	2020	2050	2020	2050
Односемейный дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	831	758	8194	4329
		Котел на газе	1554	1499	5138	2083
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	690	784	5329	2720
		Котел на газе	1433	1756	3364	1334
Небольшой жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	1166	1058	16186	8499
		Котел на газе	1856	1773	10203	4108
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	1073	1201	11425	6014
		Котел на газе	1772	1992	7213	2918
Средний жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	1631	1479	27297	14166
		Котел на газе	2292	2172	17203	6845
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	1540	1849	20447	11155
		Котел на газе	2205	2498	12910	5318
Большой жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	2711	2457	59801	30992
		Котел на газе	3378	3171	37693	14981
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	2657	2984	42030	22201
		Котел на газе	3322	3556	26566	10761

Таблица 7-6.

Удельные капитальные и эксплуатационные затраты при использовании синтетических топлив в транспортном секторе

Транспортный сектор		Удельные кап. затраты (евро/км)		Удельные эксл. затраты (евро/км)	
Вид транспорта	Применение синтетического топлива ²³	2020	2050	2020	2050
Небольшой легковой автомобиль	Синтетический бензин	0,207	0,207	0,026	0,027
	Синтетическое дизтопливо	0,148	0,148	0,019	0,019
	Синтетический газ	0,123	0,123	0,011	0,012
	Водород (топливный элемент) бензин	0,304	0,204	0,028	0,009
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	0,155	0,135	0,028	0,009
	Водород (топливный элемент) газ	0,13	0,135	0,028	0,009
Легковой автомобиль класса “компакт”	Синтетический бензин	0,3	0,288	0,03	0,032
	Синтетическое дизтопливо	0,166	0,209	0,023	0,023
	Синтетический газ	0,13	0,194	0,013	0,013
	Водород (топливный элемент) бензин	0,383	0,236	0,043	0,013
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	0,196	0,156	0,043	0,013
	Водород (топливный элемент) газ	0,164	0,156	0,043	0,013
Легковой автомобиль среднего класса	Синтетический бензин	0,379	0,36	0,031	0,033
	Синтетическое дизтопливо	0,213	0,265	0,025	0,025
	Синтетический газ	0,173	0,254	0,013	0,014
	Водород (топливный элемент) бензин	0,173	0,254	0,013	0,014
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	0,466	0,289	0,05	0,016
	Водород (топливный элемент) газ	0,238	0,192	0,05	0,016
Легковой автомобиль высшего класса	Синтетический бензин	0,554	0,524	0,035	0,037
	Синтетическое дизтопливо	0,265	0,33	0,031	0,031
	Синтетический газ	0,213	0,314	0,015	0,016
	Водород (топливный элемент) бензин	0,984	0,758	0,051	0,016
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	0,503	0,502	0,051	0,016
	Водород (топливный элемент) газ	0,42	0,502	0,051	0,016
Мотоцикл	Синтетический бензин	0,192	0,201	0,024	0,021

²³ Топливо, произведенное с помощью электроэнергии.

Городской автобус	Синтетическое дизтопливо	0,98	0,983	0,21	0,27
	Синтетический газ	1,068	1,045	0,104	0,133
	Водород (топливный элемент) бензин	1,46	0,986	0,086	0,038
	Водород (топливный элемент) газ	1,46	0,986	0,083	0,038
Междугородный автобус	Синтетическое дизтопливо	0,239	0,24	0,142	0,184
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	0,365	0,25	0,056	0,025
Пригородный поезд	Синтетическое дизтопливо	2,143	2,184	0,372	0,476
Поезд дальнего сообщения	Синтетическое дизтопливо	1,157	1,157	0,172	0,22
Небольшой пассажирский самолет	Синтетический керосин	2,677	2,677	2,011	1,902
Большой пассажирский самолет	Синтетический керосин	7,024	7,024	3,286	3,109
Малотоннажное грузопассажирское транспортное средство	Синтетический бензин	0,347	0,381	0,355	0,017
	Синтетическое дизтопливо	0,203	0,229	0,447	0,195
	Синтетический газ	0,19	0,199	0,267	0,091
	Водород (топливный элемент) бензин	0,677	0,454	0,076	0,027
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	0,397	0,273	0,076	0,027
	Водород (топливный элемент) газ	0,355	0,239	0,076	0,027
Грузопассажирское транспортное средство средней тоннажности	Синтетический бензин	0,261	0,248	0,655	0,318
	Синтетическое дизтопливо	0,206	0,201	0,812	0,39
	Синтетический газ	0,263	0,225	0,492	0,168
	Водород (топливный элемент) бензин	0,535	0,226	0,158	0,056
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	0,535	0,266	0,158	0,056
	Водород (топливный элемент) газ	0,535	0,266	0,158	0,056
Много тоннажное грузопассажирское транспортное средство	Синтетическое дизтопливо	0,37	0,368	1,157	0,466
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	1,121	0,431	0,28	0,11
Бортовой полуприцеп	Синтетическое дизтопливо	0,325	0,355	1,505	0,607
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	1,375	0,424	0,365	0,143
Грузовой поезд	Синтетическое дизтопливо	52,433	58,208	63,076	33,298
Небольшой транспортный самолет	Синтетический керосин	2,677	2,677	14,853	5,8
Большой транспортный самолет	Синтетический керосин	7,024	7,024	24,272	9,478
Суда речного сообщения	Синтетическое дизтопливо	6,167	6,167	24,17	12,759
	Водород (топливный элемент) дизтопливо	6,908	5,707	9,796	4,258

Таблица 7-7.

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием синтетических топлив
в промышленном секторе**

Промышленный сектор	Удельные кап затраты (евро/т)		Удельные эксл. затраты (евро/т)	
	2020	2050	2020	2050
Производственный процесс	2020	2050	2020	2050
Производство стали	153	153	610	269
Цементное производство	+106 евро/т	+106 евро/т	61	33
Известковое производство	Не определены	Не определены	185	80
Другие отрасли промышленности (потребление газа с температурой выше 500°C)	Суммарные затраты			
Другие промышленные процессы	2020		2050	
Другие отрасли	Не определены		Не определены	
Другие отрасли промышленности без производства стали, цемента и извести	Не определены		Не определены	

Приложение В.3: применения электрифицированных технологий

Таблица 7-8.

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием электроэнергии
в секторе домашнего хозяйства**

Сектор домашнего хозяйства			Удельные капитальные затраты, евро/здание		Удельные эксплуатационные затраты, евро/здание	
Тип здания	Возраст здания	Применение электрификации	2020	2050	2020	2050
Односемейный дом	До 1994 г.	Воздушный тепловой насос	2643	2298	369	263
	После 1995 г.		2220	1992	227	160
Небольшой частный дом	До 1994 г.	Воздушный тепловой насос	3673	3178	715	506
	После 1995 г.		3399	3131	485	340
Средний частный дом	До 1994 г.	Воздушный тепловой насос	5105	4396	1164	811
	После 1995 г.		4722	4453	840	595
Большой частный дом	До 1994 г.	Воздушный тепловой насос	12064	10344	2505	1733
	После 1995 г.		11576	10255	1687	1127

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием электроэнергии
в транспортном секторе**

Транспортный сектор		Удельные капитальные затраты (евро/км)		Удельные эксплуатационные затраты (евро/км)	
		2020	2050	2020	2050
Применение	Электроэнергия ²⁴ /применение				
Небольшой легковой автомобиль	Электромобиль бензин	0,296	0,206	0,006	0,004
	Электромобиль дизтопливо	0,151	0,137	0,006	0,004
	Электромобиль газ	0,126	0,137	0,006	0,004
Легковой автомобиль класса “компакт”	Электромобиль бензин	0,349	0,228	0,008	0,006
	Электромобиль дизтопливо	0,178	0,151	0,008	0,006
	Электромобиль газ	0,149	0,151	0,008	0,006
Легковой автомобиль среднего класса	Электромобиль бензин	0,409	0,274	0,01	0,007
	Электромобиль дизтопливо	0,209	0,182	0,01	0,007
	Электромобиль газ	0,175	0,182	0,01	0,007
Легковой автомобиль высшего класса	Электромобиль бензин	1,068	0,784	0,01	0,007
	Электромобиль дизтопливо	0,545	0,519	0,01	0,007
	Электромобиль газ	0,456	0,519	0,01	0,007
Мотоцикл	Электроэнергия бензин	0,172	0,166	0,004	0,003
Городской автобус	Электроэнергия дизтопливо	1,24	1,123	0,034	0,027
	Электроэнергия газ	1,24	1,123	0,034	0,027
Междугородный автобус	Электроэнергия дизтопливо	0,35	0,316	0,025	0,02
Пригородный поезд	Электроэнергия дизтопливо	1,679	1,679	0,18	0,141
Поезд дальнего следования	Электроэнергия дизтопливо	6,991	6,991	2,553	2,004
	Электроэнергия газ				
Малотоннажное грузопассажирское транспортное средство	Электроэнергия бензин	0,421	0,364	0,015	0,009
	Электроэнергия дизтопливо	0,246	0,219	0,015	0,009
	Электроэнергия газ	0,221	0,191	0,015	0,009
Грузопассажирское транспортное средство средней тоннажности	Электроэнергия бензин	0,433	0,304	0,038	0,026
	Электроэнергия дизтопливо	0,433	0,304	0,038	0,026
	Электроэнергия газ	0,433	0,304	0,038	0,026
Много тоннажное грузопассажирское транспортное средство	Электроэнергия дизтопливо	0,171	0,454	0,053	0,038
Бортовой полуприцеп	Электроэнергия дизтопливо	0,623	0,431	0,068	0,049
Грузовой поезд	Электроэнергия дизтопливо	80,891	80,891	3,484	2,734

²⁴ Капитальные затраты, нормализованные к годовому пробегу для традиционной конечному энергоносителю, например, бензину, дизтопливу или природному газу

Таблица 7-10.

**Удельные капитальные и эксплуатационные затраты
для выбранных технологий с использованием электроэнергии
в промышленном секторе**

Промышленный сектор	Удельные капитальные затраты (евро/т)		Удельные эксплуатационные затраты (евро/т)	
	2020	2050	2020	2050
Производственные процессы с использованием электроэнергии	2020	2050	2020	2050
Производство стали ограниченного применения	137	137	28	22

**Приложение С: Удельное потребление традиционных источников энергии
в различных секторах, с различными технологиями и применениями**

Таблица 7-11.

**Удельное потребление конечной энергии с применениями
в секторе домашнего хозяйства**

Сектор домашнего хозяйства			Удельное потребление (МВтч/здание)		Количество зданий	
Тип здания	Возраст здания	Применение синтетического топлива	2020	2050	2020	2050
Односемейный дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	23,8	23,82	2117454	877105
		Котел на газе	23,48	23,5	2999186	2347690
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	15,48	14,97	162294	85778
		Котел на газе	15,37	15,05	772807	603417
Небольшой жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	47,02	46,77	297448	128994
		Котел на газе	46,63	46,34	909638	743166
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	33,19	33,1	38409	23947
		Котел на газе	32,97	39,92	225642	214776
Средний жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	79,3	77,95	114949	49486
		Котел на газе	78,62	77,23	17203	6845
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	59,4	61,38	12945	8150
		Котел на газе	59,01	59,99	76020	72551
Большой жилой дом	До 1994 г.	Котел на жидком топливе	173,72	170,55	27634	11884
		Котел на газе	172,27	169,01	85213	69442
	После 1995 г.	Котел на жидком топливе	122,1	122,17	3553	2150
		Котел на газе	121,37	121,4	20866	19519

Таблица 7-12.

**Удельное потребление конечной энергии с применениями
в транспортном секторе**

Транспортный сектор		Удельное потребление (кВтч/км)		Общий годовой пробег (млн. км)	
		2020	2050	2020	2050
Виды транспорта	Ископаемое топливо/применение				
Небольшой легковой автомобиль	Бензин	0,51	0,43	69861	16991
	Дизтопливо	0,42	0,33	83343	52528
	Газ	0,49	0,41	2551	31111
Легковой автомобиль класса "компакт"	Бензин	0,59	0,49	69724	16958
	Дизтопливо	0,51	0,4	83180	52425
	Газ	0,57	0,48	2546	31050
Легковой автомобиль среднего класса	Бензин	0,61	0,51	40229	9784
	Дизтопливо	0,54	0,42	47993	30248
	Газ	0,59	0,5	1469	17915
Легковой автомобиль высшего класса	Бензин	0,68	0,57	86264	20981
	Дизтопливо	0,66	0,51	102912	64862
	Газ	0,66	0,56	3150	38416
Мотоцикл	Бензин	0,41	0,38	18013	8802
Городской автобус	Дизтопливо	4,53	4,56	2736	1586
	Газ	4,6	4,72	100	590
Междугородный автобус	Дизтопливо	3,06	3,11	482	279
Пригородный поезд	Дизтопливо	8,03	8,03	386	374
Поезд дальнего сообщения	Дизтопливо	3,71	3,71	36	36
Небольшой пассажирский самолет	Керосин	43,15	31,92	138	145
Большой пассажирский самолет	Керосин	70,51	52,16	898	912
Малотоннажное грузопассажирское транспортное средство	Бензин	1,03	0,93	1249	220
	Дизтопливо	1,3	1,07	51508	58848
	Газ	1,22	1,03	984	3435
Грузопассажирское транспортное средство средней тоннажности	Бензин	1,93	1,75	6	6
	Дизтопливо	2,36	2,15	3485	3618
	Газ	2,25	1,89	3	3
Много тоннажное грузопассажирское транспортное средство	Дизтопливо	3,36	2,56	5821	6042
Бортовой полуприцеп	Дизтопливо	4,37	3,34	19418	16821
Грузовой поезд	Дизтопливо	183,24	183,24	6	6
Небольшой транспортный самолет	Керосин	43,15	31,92	7	13
Большой транспортный самолет	Керосин	70,51	52,16	627	1168
Суда речного сообщения	Дизтопливо	70,21	70,21	45	47

Таблица 7-13.

**Удельное потребление энергии ископаемых топлив
в процессах промышленного сектора**

Промышленный сектор	Удельные потребление (кВтч/т)		Объем производства (тыс. т)	
	2020	2050	2020	2050
Производственные процессы, использующие ископаемые топлива	2020	2050	2020	2050
Производство общепотребительной стали	4778,8	4778,8	26249	20008
Производство цемента	796	796	31104	28916
Производство извести	1107	1107	6605	6482
Другие отрасли промышленности (с потреблением газа с температурой > 500оС)	Потребление (ТВтч)			
Другие производственные процессы с использованием ископаемых топлив	2020		2050	
Другие отрасли промышленности	121,5		94	
Другие отрасли без производства стали, цемента и извести	120,4		93,2	